

VOLUME 6 - ANNEXE
SECTION 6.18 – Technologies ferroviaires de
propulsion électrique et à batterie



Référence du consultant: LGA-1-GN-F-FRN-RT-0006_00_Annexe 6.18
2023-02-10



Stantec | DESFOR | SYSTRA

Avec sous-consultant 



Programme d'infrastructure de transport
Étude de faisabilité, Phase I
TECHNOLOGIES FERROVIAIRES DE PROPULSION
ÉLECTRIQUE ET À BATTERIE
PHASE I DU CHEMIN DE FER DE BILLY-DIAMOND



Référence du client : 2020-01

Référence du consultant : LGA-1-BD-T-RRS-RT-0001_01

10-02-2023



Stantec | **DESFOR** | **SYSTRA**
with subconsultant **wsp**

Historique et statut du document

Révision	00	01
Date	18-01-2023	10-02-2023
Préparé par	MD/EA	EA/CS
Révisé par	CL	CL
Approuvé par	AC/PT	AC/PT
Commentaires	Rapport provisoire	Rapport final

Approbations

Préparé par :

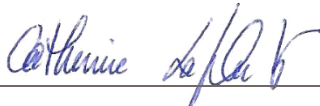


Ercan AFACAN
Directeur adjoint, Matériel roulant
SYSTRA Canada



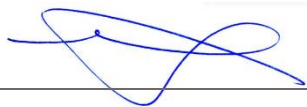
Christopher SALHANY, ing.
Directeur de projet adjoint
SYSTRA Canada

Révisé par :



Catherine LAPLANTE, M. Sc.
Économiste des transports VEI
SYSTRA Canada

Approuvé par :



Alessandro CIRELLA, P. Eng.
Directeur du projet
Stantec



Document Identification

Étude de faisabilité — Phase I —
Programme d'infrastructure de
transport

**TECHNOLOGIES FERROVIAIRES DE
PROPULSION ÉLECTRIQUE ET À
BATTERIE**

Référence du consultant :
LGA-1-BD-T-RRS-RT-0001_01
10-02-2023

Table *des* matières

1. Liste des abréviations.....	5
2. Introduction.....	6
2.1 Contexte	6
2.2 Objectif de l'étude.....	7
3. Matériel roulant	9
3.1 Aperçu des technologies existantes.....	9
3.1.1 Trains diesel	9
3.1.2 Trains électriques à caténaires	11
3.1.3 Trains à batterie.....	13
3.1.4 Trains hybrides.....	17
3.2 Discussion	18
3.3 Maintenance du matériel roulant.....	19
4. Le chemin de fer billy-diamond	20
4.1 Caractéristiques générales	20
4.2 Exploitation.....	21
4.2.1 Trains de marchandises	22
4.2.2 Trains de voyageurs.....	23
5. Hypothèses.....	24
5.1 Disponibilité de l'équipement	24
5.2 Besoins énergétiques.....	24
5.3 Enjeux liés aux locomotives à batterie.....	26
5.4 Alimentation du chemin de fer.....	27
6. Description des scénarios.....	28
6.1 Option A : Locomotives électriques à caténaires.....	28
6.2 Option B : Locomotives électriques à batterie.....	30
6.2.1 Scénario B1 : Charge au terminal	30
6.2.2 Scénario B2 : Recharge à une station située à mi-parcours (PK 118).....	30
6.2.3 Scénario B3 : Remplacement des batteries à mi-parcours (PK 118)	30
6.2.4 Scénario B4 : Approche hybride diesel-batterie.....	31

7. Modélisation de l'énergie statique	32
7.1 Capacité de la batterie disponible	32
7.2 Analyse des scénarios	32
7.2.1 Scénario B1 : Charge au terminal	32
7.2.2 Scénario B2 : Recharge à une station située à mi-parcours (PK 118).....	34
7.2.3 Scénario B3 : Remplacement des batteries à mi-parcours (PK 118)	36
7.2.4 Scénario B4 : Approche hybride diesel-batterie.....	36
7.2.5 Train de voyageurs.....	37
7.2.6 Synthèse des résultats de la modélisation énergétique.....	39
7.3 Infrastructure et autres exigences	40
8. Coût d'investissement (CAPEX)	42
9. Coût d'exploitation (OPEX) et d'investissement de maintien	43
10. Comparaison des investissements et discussion	44
11. Conclusion	47

Liste des tableaux

Tableau 3-1 : Comparaison des coûts du diesel et d'électricité pour différentes régions.....	12
Tableau 4-1 : Caractéristiques du chemin de fer Billy-Diamond	20
Tableau 4-2 : Limites de vitesse applicables à la classe 3.....	21
Tableau 4-3 : Spécifications des wagons de marchandises	22
Tableau 4-4 : Configuration du train de marchandises	22
Tableau 4-5 : Spécifications des locomotives EMD SD70	23
Tableau 4-6 : Service de trains de voyageurs sur le chemin de fer Billy-Diamond.....	23
Tableau 4-7 : Spécifications pour la voiture de voyageurs et le groupe électrogène	23
Tableau 5-1 : Spécifications des locomotives à batterie pour les besoins de la présente étude	24
Tableau 5-2 : Énergie nécessaire à la traction par trajet d'un train tiré par deux locomotives à batterie.....	25
Tableau 7-1 : Capacité de batterie disponible pour les locomotives et les wagons-batteries.....	32
Tableau 7-2 : Calcul des besoins en wagons-batteries pour le scénario B1 (trains de marchandises)	33
Tableau 7-3 : Besoins en énergie de traction (scénario B2)	34
Tableau 7-4 : Calcul des besoins en wagons-batteries (scénario B2)	35

Tableau 7-5 : Résumé des économies de carburant pour le scénario B4.....	37
Tableau 7-6 : Besoins en énergie de traction (train de voyageurs)	37
Tableau 7-7 : Consommation de carburant diesel (scénario hybride du train de voyageurs)	38
Tableau 7-8 : Résumé des besoins en matériel roulant pour chaque scénario.....	39
Tableau 7-9 : Résumé de la consommation d'énergie pour chaque scénario	40
Tableau 7-10 : Comparaison des besoins en infrastructures et autres pour chaque scénario, ainsi que de l'impact sur les opérations	41
Tableau 8-1 : Estimation comparative des coûts d'investissement	42
Tableau 9-1 : Coûts d'exploitation et d'investissement de maintien pour tous les scénarios	43
Tableau 10-1 : Résumé de la réduction annuelle de la consommation de carburant et des émissions.....	45

Liste des figures

Figure 2-1 : Composantes du programme La Grande Alliance concernant les infrastructures de transport.....	7
Figure 3-1 : Nouvelles normes potentielles d'émission de niveau 5	11
Figure 4-1 : Le tracé approximatif du chemin de fer Billy-Diamond.....	21
Figure 5-1 : Vitesse du train pour un train de fret tiré par deux locomotives à batterie PR de type 1 roulant vers le sud depuis Waskaganish (PK 236) jusqu'à la voie d'évitement pour le bois d'œuvre (PK 60).....	25
Figure 5-2 : Carte des installations d'Hydro-Québec.....	27
Figure 6-1 : Schéma de l'infrastructure d'électrification requise	29
Figure 7-1 : Diagramme du cycle du train (scénario B1).....	34
Figure 7-2 : Diagramme du cycle du train (scénario B2).....	35
Figure 7-3 : Diagramme du cycle du train (scénario B3).....	36
Figure 10-1 : Comparaison des coûts d'investissement de chaque scénario	44
Figure 10-2 : Comparaison des coûts d'exploitation et des coûts annualisés d'investissement de maintien pour les différents scénarios.....	45

1. LISTE DES ABRÉVIATIONS

Acronymes	Abréviation
CAPEX	Capital Expenditure (Coût d'investissement)
CFGC	Chemin de fer Grevet et Chapais
EPA	U.S. Environmental Protection Agency
GES	Gaz à effet de serre
HP	Horsepower
HQ	Hydro-Québec
km	kilomètre
PK	Point kilométrique
kV	kilovolt
kWh	Kilowattheure
L	litres
m	mètres
mm	millimètres
mi/h	mille à l'heure
MTPA	million de tonnes par an
MW	mégawatt
MWh	mégawattheure
OLE	Overhead line equipment (catenary) (Équipement de lignes aériennes (caténaire))
OPEX	Operational expenditures (Coût d'exploitation)
pi	pied
po	pouce
PR	Progress Rail
RBD	Route Billy-Diamond
REM	Réseau Express Métropolitain
ROW	Right-of-way (Emprise du chemin de fer)
t éq. CO ₂ /km	Tonne d'équivalent CO ₂ par kilomètre
TPC	Train Calculator Performance (Programme d'évaluation des performances des engins de traction)
UE	Union européenne
US	(pour \$ américains)

2. INTRODUCTION

2.1 CONTEXTE

La Grande Alliance est un protocole d'entente innovant entre la Nation crie et le gouvernement québécois axé sur le développement économique du territoire de la Nation et sur ses droits culturels et ancestraux spécifiques sur le terrain. En vue d'assurer une véritable collaboration à long terme, cette alliance s'articule autour de trois éléments principaux : Connecter, Développer et Protéger.

Faisant suite à l'entente La Paix des Braves de 2002, établie dans le cadre de la Convention de la Baie-James et du Nord québécois (1975), cette alliance mobilise toutes les communautés de la Nation Crie (« Connecter ») afin de les inciter à contribuer à une vision commune du développement socio-économique du territoire (« Développer »), tout en protégeant leurs façons de faire et leurs biens patrimoniaux (« Protéger »).

La Grande Alliance procède donc à l'étude de faisabilité de la phase 1 du développement du territoire, qui comprend un réseau routier et ferroviaire dans la partie sud du territoire, avec pour objectif principal le développement socio-économique respectueux des communautés.

Il s'agit d'une première étape importante qui servira de pierre angulaire pour l'avenir de la Nation crie et ses relations avec le gouvernement québécois.

Le programme de La Grande Alliance se compose des trois phases suivantes (Figure 2-1) :

- La phase I comprend le prolongement de la voie ferrée entre Matagami et Rivière Rupert (PK 257 de la route Billy — Diamond [RBD]), la remise en service du chemin de fer Grevet-Chapais (CFGC), la mise en place de centres de transbordement le long de ces deux voies ferrées (en particulier un près du PK 257 de la RBD) et l'amélioration/l'asphaltage des routes d'accès vers quatre communautés cries).
- La phase II comprend le prolongement de la route Billy-Diamon entre Radisson et Whapmagoostui/Kuujuarapiik, le prolongement de la route 167 en direction du nord jusqu'à la route Transtaïga, et le prolongement de la voie ferrée entre Rivière Rupert et Radisson.
- La phase III comprend le prolongement du chemin de fer de Radisson à Whapmagoostui/Kuujuarapiik et la construction d'un port en eau profonde sur la baie James à Whapmagoostui/Kuujuarapiik. Le prolongement

de la route Transtaiga vers l'est jusqu'à Schefferville a d'abord été envisagé, puis retiré du champ d'étude.



Figure 2-1 : Composantes du programme La Grande Alliance concernant les infrastructures de transport

2.2 OBJECTIF DE L'ÉTUDE

Il est difficile d'ignorer les effets du changement climatique dans le monde à l'heure actuelle : impact sur les rendements agricoles et risque de pénurie alimentaire, fréquence accrue de phénomènes naturels extrêmes (tels que les inondations, les ouragans et les incendies de forêt) qui menacent les habitations et la sécurité des gens, perturbation des cycles naturels qui entraînent une diminution significative de la population animale mondiale, pour n'en citer que quelques-uns. Il importe de souligner aussi le coût financier engendré par le changement climatique¹, dont les causes ont été essentiellement liées à l'activité humaine et à la libération de gaz à effet de serre (GES) dans l'atmosphère.²

En réponse aux risques posés par le changement climatique, les pays et les organisations du monde entier se fixent des objectifs de réduction des émissions de GES dans le but de freiner le réchauffement de la planète et

¹ <https://www.ucdavis.edu/climate/news/cost-climate-change>

² <https://www.ipcc.ch/2021/08/09/ar6-wg1-20210809-pr/>

d'en limiter les effets. En 2020, le Canada a adopté le plan de réduction des émissions pour 2030 visant à réduire les émissions de GES de 40 à 45 % par rapport à celles produites en 2005, et ultimement à atteindre la carboneutralité d'ici 2050.³

Pour atteindre leurs propres objectifs de réduction des émissions de carbone, les grandes sociétés minières telles que Rio Tinto et Vale envisagent désormais de recourir à des modes de propulsion alternative, dont deux principaux : l'électrification conventionnelle et les locomotives alimentées par batterie.

Cette étude vise à analyser et valider la faisabilité de l'utilisation de modes de propulsion alternative ferroviaires pour la phase 1 du chemin de fer Billy-Diamond, dans le but de réduire les émissions de GES sur l'ensemble de la durée du projet. Elle portera sur les éléments suivants :

- Les trains alimentés par batterie.
- Les trains électriques alimentés par caténaire.
- Les trains hybrides combinant batteries et moteur diesel.

³ <https://www.canada.ca/fr/services/environnement/meteo/changementsclimatiques/plan-climatique/survol-plan-climatique.html>

3. MATÉRIEL ROULANT

Les sections suivantes présentent les différents modes de propulsion ferroviaires existants, ainsi que leur niveau de maturité, leur statut sur le marché, leur praticité et leur impact sur l'environnement. Les modes de propulsion abordés sont le diesel, la caténaire, la batterie électrique, l'hydrogène et les trains hybrides.

3.1 APERÇU DES TECHNOLOGIES EXISTANTES

Les récents développements relatifs au matériel roulant ferroviaire ont montré de nombreuses applications des trains labellisés « zéro-émission ou à émissions faibles », qui s'appuient sur des technologies innovantes. Si jusque-là ces applications ont été principalement limitées au transport urbain, des modes de propulsion alternative semblent prometteurs pour soutenir la croissance du transport ferroviaire conventionnel.

Le transport ferroviaire représente environ 1 % des émissions totales liées au secteur du transport dans le monde.⁴ Dans l'Union européenne (UE), le réseau ferroviaire est principalement électrifié, en particulier sur les principaux axes de transport et dans les zones urbaines. À l'heure actuelle, environ 60 % du réseau de l'UE est électrifié et transporte approximativement 80 % du trafic ferroviaire dans cette région. Ailleurs, comme en Amérique du Nord, au Moyen-Orient et en Afrique, les chemins de fer sont rarement électrifiés.

Bien qu'il y ait peu de contraintes techniques à l'électrification d'une ligne de chemin de fer, le coût de construction de l'infrastructure peut être élevé. Il faut également prendre en compte la manière dont l'énergie est fournie, car les modes de production d'électricité peuvent varier considérablement d'un pays à l'autre, voire au sein d'un même pays.

Il importe de noter qu'aujourd'hui, toutes les opérations de fret ferroviaire en Amérique du Nord se basent sur la propulsion diesel. Mais, récemment, certaines compagnies ferroviaires de classe 1 ont commencé à tester d'autres technologies dans le but de minimiser ou d'éliminer complètement la propulsion diesel de leur parc.

3.1.1 Trains diesel

3.1.1.1 Technologie

La propulsion diesel est une technologie bien établie. Le diesel est depuis longtemps l'option de choix pour le transport de voyageurs et de marchandises par voie ferroviaire, grâce à son efficacité, sa durabilité et sa fiabilité. Les chemins de fer de marchandises américains peuvent, en moyenne, transporter une tonne de marchandises sur plus de 470 milles avec un seul gallon de carburant diesel, grâce à la faible résistance au roulement des roues en acier et à l'efficacité énergétique des locomotives diesel.⁵

Il existe deux catégories de trains diesel : le train diesel « pur » (avec transmission mécanique) et le train « diesel-électrique » où des moteurs diesel génèrent l'énergie utilisée par les moteurs de traction électriques, améliorant ainsi l'efficacité énergétique et les performances à faible vitesse.

Le diesel est le type de moteur à combustion interne le plus efficace sur le plan énergétique et le carburant principal des secteurs clés de l'économie mondiale. Les moteurs diesel les plus récents tendent vers le net zéro,

⁴ <https://ourworldindata.org/co2-emissions-from-transport>

⁵ globenewswire.com

avec un rendement énergétique toujours plus élevé et des émissions de CO₂ relativement faibles, et d'autres avancées se profilent à l'horizon. De plus, ces moteurs, nouveaux et existants, peuvent utiliser des biocarburants renouvelables à faible teneur en carbone. Tous ces éléments font de la technologie diesel une partie de la solution pour réduire les émissions de GES.

3.1.1.2 Situation actuelle du marché

En Amérique du Nord, le diesel est le mode de propulsion dominant dans les opérations ferroviaires. Quoique d'autres modes de traction soient actuellement testés, notamment au gaz naturel liquide et au gaz naturel comprimé, les chemins de fer de classe 1 continuent d'exploiter des trains diesel sur de grandes distances. Fin 2018, un peu plus de 26 000 locomotives de fret⁶ à moteur diesel étaient en service aux États-Unis. Très longs et très chargés, ces trains sont peu nombreux par ligne et parcourent de longues distances. L'Australie est également dépendante du diesel pour son industrie ferroviaire, tout comme le Brésil. Aussi, une grande partie du réseau russe compte sur la traction diesel, tout comme les réseaux d'Asie, d'Amérique latine et d'Afrique.

À l'heure actuelle, les efforts se poursuivent pour fabriquer des moteurs diesel à zéro émission nette. Les moteurs de locomotives sont en perpétuelle évolution, et les plus récents sont désormais capables de répondre aux normes américaines de niveau 4 de l'EPA pour les émissions de particules et d'oxydes d'azote, grâce au carburant diesel à très faible teneur en soufre. Des additifs au diesel peuvent aussi limiter son impact environnemental.

3.1.1.3 Impacts environnementaux

Empreinte carbone : La production, la distribution et la combustion du diesel génèrent toutes des émissions de GES. La combustion d'un litre de carburant diesel produit environ 2,68 kg de CO₂.⁷ En France, selon l'agence ADEME, le facteur d'émission du diesel du puits à la roue est de 3,25 kg éq. CO₂/L.⁸

Pollution de l'air : La technologie des locomotives de niveau 4 contribue à réduire les émissions de particules des locomotives diesel de 90 % et celles d'oxyde d'azote de 80 %.⁹ Actuellement, toutes les nouvelles locomotives vendues aux États-Unis doivent répondre aux normes de niveau 4. Les locomotives diesel plus anciennes, vendues sur le marché de l'occasion, seraient une option moins chère que celles de niveau 4, toutefois elles produiraient des émissions nettement plus élevées.

Afin d'accélérer le virage vers des locomotives zéro émission, le California Air Resources Board (ARB) a demandé à l'EPA d'adopter des normes d'émissions plus strictes, incluant des normes pour les locomotives neuves (que l'ARB appelle de « niveau 5 »), et une nouvelle norme pour les locomotives de niveau 4 remises à neuf.¹⁰

⁶ globenewswire.com

⁷ [US Energy Information Administration](http://www.eia.doe.gov)

⁸ [Documentation Base Carbone \(ademe.fr\)](http://www.ademe.fr)

⁹ [https://www.aar.org/article/freight-rail-moving-miles-ahead-on-sustainability/#!](https://www.aar.org/article/freight-rail-moving-miles-ahead-on-sustainability/)

¹⁰ <https://www.greencarcongress.com/2017/04/20170414-arb.html>

Potential Amended Emission Standards for Newly Manufactured Locomotives and Locomotive Engines

Tier Level	Proposed Year of Manufacture	NOx		PM		GHG		HC		Proposed Effective Date
		Standard (g/bhp-hr) ¹	Percent Control ²	Standard (g/bhp-hr) ¹	Percent Control ²	Standard (g/bhp-hr) ¹	Percent Control ¹	Standard (g/bhp-hr)	Percent Control ²	
5	2025	0.2	99+	<0.01	99	NA	10-25%	0.02	98	2025
With capability for zero-emission operation in designated areas.										

1. ARB, Technology Assessment: Freight Locomotives, 2016.³
2. Compared with uncontrolled baseline, reflects percent control over line haul baseline for illustrative purposes; ARB staff assumed older pre-Tier 0 line haul and switch locomotives would be able to emit up to the Tier 0 PM emission standards, based on American Association of Railroads in-use emission testing (required to comply with U.S. EPA in-use emission testing requirements) for older switch locomotives with EMD 645 engines.

Figure 3-1 : Nouvelles normes potentielles d'émission de niveau 5¹¹

Pollution sonore : La principale source de bruit à vitesse moyenne provient du frottement entre les roues et le rail, tandis que lorsque le train roule lentement ou est à l'arrêt, le bruit du moteur et des autres équipements énergétiques prédomine. Notons que le bruit du frottement des roues est beaucoup plus prononcé pour les trains de marchandises¹² que pour les trains de voyageurs.

Les déversements de carburant constituent une autre préoccupation environnementale importante. Le carburant diesel, comme d'autres à base d'hydrocarbures, peut entraîner une contamination du sol ou des eaux souterraines à la suite d'un déversement.¹³

3.1.2 Trains électriques à caténares

3.1.2.1 Technologie

L'électrification est l'option alternative du diesel la plus établie et présentant le risque technique le plus faible. La propulsion électrique caténaire est le mode dominant pour les trains de voyageurs et de marchandises qui parcourent de longues distances sur les réseaux ferroviaires de l'UE. Cela est dû à sa praticité, aux plus faibles risques de sécurité pour les utilisateurs et au recours à des tensions plus élevées pour limiter les pertes de transmission de l'électricité sur les longues distances. Par ailleurs, les locomotives électriques présentent l'avantage d'être plus silencieuses et à zéro émission, et elles sont généralement considérées comme plus fiables que les locomotives diesel.

L'électricité est habituellement moins chère par unité de fret transportée que le diesel. L'Union internationale des chemins de fer estime que les coûts d'électricité pour la propulsion des trains ne représentent que 50 à 60 % des coûts de la propulsion diesel lorsqu'ils sont comparés directement¹⁴. Cette différence de coût est encore plus

¹¹ greencarcongress.com

¹² [https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/etudes/join/2012/474533/IPOL-TRAN_ET\(2012\)474533_FR.pdf](https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/etudes/join/2012/474533/IPOL-TRAN_ET(2012)474533_FR.pdf)

¹³ <https://railroads.dot.gov/sites/fra.dot.gov/files/2021-06/Study%20of%20Hydrogen%20Fuel%20Cell%20Tech.pdf>

¹⁴ oliverwyman.com

grande au Québec, où le prix de l'électricité est très bas par rapport aux normes internationales.¹⁵ L'entretien d'une locomotive électrique est également moins coûteux que celui d'une locomotive diesel, puisqu'elle comporte moins de pièces mobiles.

L'un des inconvénients majeurs de l'électrification des chemins de fer est le coût élevé de l'équipement des lignes aériennes (caténaires). Les coûts d'investissement pour l'électrification d'une ligne ferroviaire s'élèvent souvent à plusieurs millions de dollars par kilomètre, y compris les coûts liés à l'équipement de production d'énergie, aux transformateurs, aux lignes de transmission et aux caténaires, ainsi qu'à l'interruption de service causée par l'installation des câbles aériens. Cet investissement majeur dans l'infrastructure s'amortit généralement sur une longue période, ce qui peut contrecarrer les avantages des économies d'énergie et de maintenance.¹⁶ Dans le cas des lignes de fret transnationales, leur électrification complète peut également poser des problèmes d'interopérabilité.

Par ailleurs, il faut s'assurer que la construction d'un système de caténaires soit compatible avec les exigences de hauteur liées aux ponts et aux tunnels situés le long de l'itinéraire.

Plusieurs locomotives électriques à caténaires sont actuellement exploitées dans le monde pour le transport de marchandises. Cependant, aux États-Unis, elles sont peu utilisées pour le fret et les dernières datent de 25 ans ou plus. Aucun des deux principaux fabricants de locomotives, à savoir General Electric et EMD (qui fait maintenant partie de Progress Rail), n'a produit de locomotive électrique caténaire depuis plus de 25 ans. Par ailleurs, l'importation de locomotives en Amérique du Nord pose d'importants défis dus aux normes nord-américaines.

3.1.2.2 Situation actuelle du marché

Environ un quart seulement des lignes ferroviaires dans le monde sont électrifiées par caténaires. Le taux d'électrification caténaire varie d'un pays à l'autre, de 99 % en Suisse à 62 % dans l'UE, en passant par 47 % en Asie et moins de 1 % en Amérique du Nord.¹⁷ Actuellement, aucune locomotive de fret électrifiée n'est vendue ou exploitée en Amérique du Nord. Le Tableau 3-1 compare les coûts du diesel et de l'électricité dans diverses régions du monde.

Tableau 3-1 : Comparaison des coûts du diesel et d'électricité pour différentes régions

Pays	Suisse	UE	Asie	États-Unis	Canada
Prix du diesel (\$ US/L)	2,246 (a)	1,9396 (b)	1,1596 (a) (c)	1,411 (a)	1,672 (a)
Prix de l'électricité (\$ US/kWh)	0,163 (a)	0,22 (b)	0,099 (a) (c)	0,128 (a)	0,094 (a) 0,040 (QUÉBEC)

(a) https://fr.globalpetrolprices.com/electricity_prices/

(b) <https://selectra.info/energie/electricite/prix/europe>,

(c) Valeur moyenne pour la Chine, Singapour, l'Inde, la Malaisie et l'Indonésie

¹⁵ 0,05227 \$ CAD/kWh au moment de la rédaction de ce rapport.

¹⁶ [Institute of Transport Economics](https://www.instituteoftransporteconomics.com/)

¹⁷ <https://journals.sagepub.com/doi/full/10.1177/0954409719867495>

3.1.2.3 Impacts sur l'environnement

Empreinte carbone : Les trains électriques ne produisent aucune émission directe de carbone, car ils sont entièrement propulsés par des moteurs électriques. Cependant, il faut tenir compte des modes de production de l'électricité qui alimente ces moteurs (émissions du puits au réservoir). De grandes quantités d'émissions de carbone sont associées à la production d'électricité par combustion de charbon ou de combustibles fossiles. Heureusement, environ 96 % de l'électricité produite au Québec provient de centrales hydroélectriques.

Dans tous les cas, l'électrification des chemins de fer peut jouer un rôle important dans la réduction des émissions locales dans les zones urbaines densément peuplées où se trouvent souvent les gares de triage intermodales.

Le site web Electricity Maps¹⁸ fournit les facteurs d'émissions associés à l'électricité pour différentes régions géographiques.

En ce qui concerne l'empreinte carbone liée à l'infrastructure et à l'équipement de caténaires, un ratio moyen d'émissions de 73 t éq. CO₂/km a été estimé sur base des données fournies par l'opérateur ferroviaire français, la SNCF. Cette analyse a été réalisée pour le renouvellement de l'infrastructure caténaire basé sur une électrification 25 kV et une tension de 1500 V.¹⁹

Pollution de l'air : Les locomotives électriques à caténaires présentent l'avantage de ne produire aucune émission directe de polluants atmosphériques.

Le terrain nécessaire à la construction de l'infrastructure caténaire doit également être pris en considération. Cela peut représenter un défi important dans les zones urbaines, et sous diverses contraintes liées à la durabilité et à la protection de la biodiversité le long de l'emprise ferroviaire (ROW).

3.1.3 Trains à batterie

3.1.3.1 Technologie

Les trains alimentés par batterie représentent la dernière génération de trains électriques et sont dotés d'un système de stockage d'énergie embarqué qui leur permet de rouler sur des lignes non électrifiées. Ils s'appuient sur les mêmes technologies liées à l'efficacité de la traction ferroviaire que les ingénieurs optimisent depuis des décennies, depuis le contact roue-rail jusqu'au freinage par récupération.²⁰ En matière de conversion d'énergie, les locomotives à batterie sont extrêmement efficaces (pourcentage d'efficacité d'environ 85 %) par rapport aux locomotives diesel (d'environ 30 %).

L'état actuel de la technologie : De nombreux efforts ont été déployés pour mettre au point des batteries légères, de petit volume et résistantes à de nombreux cycles de décharge. Le titanate de lithium est l'un des principaux types de batteries actuellement utilisés dans les véhicules électriques pour sa haute capacité, son long cycle de vie et sa stabilité chimique, ce qui en fait un bon choix pour alimenter les trains électriques. Les autres types principaux de batteries sont l'oxyde de lithium nickel cobalt aluminium, le lithium fer phosphate et l'oxyde de lithium nickel manganèse cobalt.

¹⁸ electricitymaps.com/map

¹⁹ <https://journals.sagepub.com/doi/full/10.1177/0954409719867495>

²⁰ https://www.systra.com/expert_insights/trains-zero-emission-transition-energetique-ou-greenwashing/

Le choix de la technologie des cellules de batteries dépend des exigences opérationnelles du train. Cela signifie qu'une modélisation rigoureuse est nécessaire pour définir le modèle opérationnel basé sur le profil de vitesse ou le cycle de travail du train. Les caractéristiques et le dimensionnement de la batterie sont alors définis en conséquence, ainsi que sa durée de vie prévue dans les conditions d'exploitation.

L'avantage de ce mode de propulsion est que l'énergie de freinage - l'énergie dissipée durant le freinage du train – peut être exploitée par un système de stockage et de gestion de l'énergie. Étant donné qu'une batterie ne peut pas toujours capter toute l'énergie de freinage régénérée, il est nécessaire de dissiper le surplus dans des résistances (comme pour le freinage rhéostatique). L'infrastructure de recharge des trains doit également être prise en compte, le train pouvant être rechargé aux terminaux et dans des stations de ravitaillement le long de son parcours.

L'inconvénient majeur des batteries vient de leur densité énergétique beaucoup plus faible que celle du diesel. Une analyse réalisée par le Rail Safety and Standards Board a montré que les exigences liées au stockage des batteries sont 10 à 20 fois supérieures à celles du carburant diesel.²¹ Les trains de marchandises sont plus lourds et requièrent généralement beaucoup plus d'énergie que les trains de voyageurs.²² La capacité et l'autonomie des batteries sont donc des facteurs importants à considérer, d'autant plus qu'il est peu commode de devoir recharger les batteries à intervalles rapprochés. Par ailleurs, il pourrait s'avérer pertinent de renoncer à certains espaces commerciaux à bord du train à des fins d'économies en batteries, mais cela engendrerait un impact financier.

L'une des contraintes techniques associées aux batteries vient de la variabilité significative de leurs performances et de leur autonomie en fonction des conditions opérationnelles (température/climat, géométrie de la voie, etc.). D'autres limitations importantes portent sur leur capacité d'alimentation ou leur vitesse de charge.

Développements futurs : Bien que l'industrie s'oriente actuellement vers les technologies aux ions de lithium, on s'attend à une transition progressive vers la conception de batteries à l'état solide, à mesure que les exigences concernant leur durée de vie et leur densité d'énergie et de puissance continuent d'augmenter. D'autres préoccupations concernent la résolution de problèmes de sécurité et la réduction des risques d'incendie, d'explosion et de libération de gaz toxiques. D'où la nécessité de poursuivre les travaux d'amélioration des batteries aux ions de lithium et de développer de nouvelles technologies de batteries.

Dans les batteries à l'état solide, l'électrolyte liquide hautement réactif est remplacé par un électrolyte à l'état solide, en soi plus sûr et plus rigide, qui permettrait d'augmenter la densité d'énergie de la batterie sans compromettre la sécurité. Le développement et la commercialisation de batteries à l'état solide représenteraient une véritable avancée technologique. Toutefois, des recherches supplémentaires sont requises pour garantir la stabilité des interfaces électrode/électrolyte. L'utilisation d'électrolytes solides aurait également un impact important sur les processus de fabrication.

En ce qui concerne les investissements nécessaires pour passer de la phase de projet pilote à la production commerciale, il est probable que les premières applications de batteries à l'état solide ne couvrent que certains segments du marché, tels que l'électronique grand public. Une fois que l'on pourra tirer parti des commentaires

²¹ <https://ehr.mydigitalpublication.co.uk/july-2021>

²² [Institute of Transport Economics](#)

des consommateurs et des économies d'échelle, des applications plus vastes seront envisageables, notamment en ce qui concerne les véhicules et les trains électriques. Des entreprises comme SAFT développent déjà des batteries aux ions de lithium « solides ». Selon elles, cette technologie arrivera à maturité d'ici 8 à 10 ans.²³

3.1.3.2 Situation actuelle du marché

Actuellement, tous les projets ferroviaires à batterie se focalisent sur les trains de voyageurs, mais ces dernières années, des solutions électriques à batterie ont commencé à être expérimentées sur les trains de marchandises.²⁴

En avril 2021, Burlington Northern Santa Fe Corporation (BNSF)²⁵ et Wabtec (anciennement General Electric) ont réalisé un essai sur un trajet de 350 milles entre Barstow et Stockton, en Californie.²⁶ Pour cet essai, une locomotive alimentée par batterie baptisée « FLXdrive » a été combinée à des trains diesel dans une configuration hybride, entre deux locomotives de niveau 4. La locomotive de fret électrique à batterie testée disposait d'un stockage d'énergie embarquée de 2400 kWh pouvant fournir une puissance continue de 4400 HP pendant une période de 30 à 40 minutes. Elle était équipée d'un système de gestion de l'énergie et sa vitesse maximale était d'environ 75 mi/h. Les résultats des essais ont montré une réduction moyenne de 11 % de la consommation de carburant et des émissions de GES pour le train, ce qui équivaut à une économie de plus de 6200 gallons de carburant diesel et à une réduction d'environ 62 tonnes d'émissions de CO₂.²⁷

La Compagnie des chemins de fer nationaux du Canada a récemment annoncé qu'elle avait commandé une locomotive FLXdrive de Wabtec, qui devrait être livrée en 2023.²⁸ Par ailleurs, Wabtec a annoncé sa collaboration avec General Motors pour développer et mettre en œuvre la technologie de batterie Ultium de GM pour ses locomotives.

Wabtec a également révélé que la prochaine génération de FLXdrive était déjà en cours de développement. La locomotive fournira une puissance similaire, mais elle sera dotée d'une batterie de capacité nettement supérieure (7 MWh). Selon Wabtec, ce niveau d'énergie réduirait la consommation de carburant et les émissions de carbone des locomotives jusqu'à 30 % sur certains itinéraires.

Comme la première génération de locomotives FLXdrive, la version 7 MWh sera intégrée dans des trains à unités multiples, et la gestion globale de l'énergie du train sera contrôlée par le logiciel de contrôle du train Trip Optimizer de Wabtec. L'optimisation du processus de recharge/décharge de la batterie prolongera sa durée de vie et maximisera les économies de carburant. Les locomotives FLXdrive de deuxième génération sont conçues pour une utilisation commerciale et pourraient entrer dans les chaînes d'approvisionnement au cours des prochaines années.

En juillet 2020, dans le cadre de son programme Power Shift, Vale a reçu sa première locomotive de manœuvre, entièrement électrique à batterie, conçue par Progress Rail et baptisée « EMD Joule ». Les batteries de cette

²³ saftbatteries.com

²⁴ Institute of Transport Economics

²⁵ BNSF.com

²⁶ Wabtec: Read this page for further technical details

²⁷ <https://www.wabteccorp.com>

²⁸ electrek.co

locomotive auront une capacité de stockage de 1,9 MWh, extensible à 2,4 MWh, ce qui lui permettra d'avoir une autonomie pouvant aller jusqu'à 24 heures.²⁹

Actuellement, Progress Rail propose une série de locomotives électriques à batterie EMD Joule, constituée de locomotives neuves et de locomotives diesel reconverties à la propulsion par batterie. Destinées à un large éventail d'opérations ferroviaires, avec une capacité de batteries pouvant atteindre 14,5 MWh, elles seront exploitées dans les gares de triage, les services régionaux et en tandem avec des locomotives électriques diesel.

Depuis 2022, FLXdrive de Wabtec a surpassé ses concurrents dans le secteur du fret et reçu le plus grand nombre de commandes à ce jour : Roy Hill, Canadien National, Rio Tinto, BHP et Union Pacific qui est la plus grande compagnie de chemins de fer en Amérique du Nord. De son côté, Joule de Progress Rail a reçu des commandes de Vale, FMG, BHP et Union Pacific.

Les avancées technologiques des batteries réalisées dans le secteur automobile en ce qui a trait à la capacité et la durée de vie des batteries de même que leurs coûts devraient se répercuter sur le secteur ferroviaire. Aussi, les grandes compagnies pétrolières et gazières se tailleraient une part du marché en rachetant de petits fabricants de batteries, ce qui renforcerait davantage le potentiel de cette technologie.³⁰

3.1.3.3 Impacts sur l'environnement

Empreinte carbone : À l'instar des trains électriques à caténaies, ceux à batterie ne produisent aucune émission directe de carbone. Il faut toutefois tenir compte de la pollution associée à la production de l'électricité nécessaire à la recharge des batteries. Plus la part d'énergies renouvelables dans le réseau électrique de traction est élevée, plus les émissions de CO₂ d'une locomotive à batterie sont faibles. Il est également important de prendre en considération l'empreinte carbone de la production des batteries. Selon l'Agence française de l'énergie l'ADEME, la production d'une batterie aux ions de lithium émet 125 kg CO₂/kWh.³¹

Pollution de l'air : L'électrification peut jouer un rôle important dans la réduction des émissions locales de polluants atmosphériques dans les zones urbaines densément peuplées, car les locomotives électriques à batterie ont l'avantage d'être zéro émission.

Seconde vie et recyclage : La fabrication et le démantèlement sont les étapes les plus importantes du cycle de vie d'une batterie du point de vue de l'impact environnemental. À la fin de sa première vie, une batterie possède encore 75 à 80 % de sa capacité d'origine. Le principe de la « seconde vie » consiste à optimiser l'utilisation d'un produit afin de réduire son empreinte environnementale et d'augmenter sa valeur économique. Le processus de recyclage des batteries aux ions de lithium est encore relativement peu développé en raison de la faible demande et des difficultés liées à la mise en place de solutions rentables à l'échelle industrielle. Le processus de recyclage des blocs-batteries est également plus compliqué à cause de leur structure. Cependant, les matériaux recyclés ont une empreinte carbone nettement plus faible. À titre d'exemple, l'utilisation d'aluminium recyclé génère

²⁹ <https://www.mining.com/vale-develops-first-100-electric-locomotive-in-brazil/>

³⁰ https://www.systra.com/expert_insights/trains-zero-emission-transition-energetique-ou-greenwashing/

³¹ ecologie.gouv.fr

environ 95 %³² d'émissions de GES de moins que la production d'aluminium à partir de sources naturelles. La réduction nette des émissions est estimée entre 1 et 2,5 kg de CO₂ par kilogramme de batterie recyclée.³³

La gestion de la fin de vie des batteries, y compris le recyclage des batteries automobiles et les normes de gestion des déchets, est essentielle pour réduire les volumes de matières premières nécessaires à leur fabrication et pour limiter le risque de pénuries. Plus les batteries serviront à alimenter les véhicules, plus les progrès technologiques seront rapides. Il existe au moins une entreprise nord-américaine spécialisée dans le recyclage de batteries au lithium, qui assure aujourd'hui la récupération en circuit fermé des composants des batteries aux ions lithium, avec une récupération atteignant 95 %. Il en résulte des matériaux de haute qualité pour la production de batteries, à un coût inférieur à celui des matériaux extraits des mines et raffinés.

3.1.4 Trains hybrides

3.1.4.1 Technologie

Les trains hybrides combinent des locomotives dotées de différents modes de conversion de l'énergie pour alimenter les moteurs de traction. Voici quelques-unes des combinaisons actuellement testées sur le marché :

- Locomotive à batteries à hydrogène/locomotive diesel-électrique
- Locomotive à batteries/locomotive diesel-électrique
- Locomotive à batteries/locomotive électrique à caténaires

Les trains hybrides peuvent également se composer de locomotives bimodes capables de passer d'une source d'énergie à une autre. Une locomotive hybride peut être constituée d'une locomotive diesel-électrique à laquelle est ajoutée une batterie de stockage embarquée qui sert à alimenter les moteurs de traction électriques de la locomotive. Lorsque la batterie atteint un niveau de charge minimal déterminé, le moteur diesel est alors activé.

Les trains hybrides et les systèmes de propulsion bimodes dotés de batteries situées entre la source principale d'énergie et le système de traction relié aux roues sont plus efficaces et engendrent moins d'émissions atmosphériques. L'énergie excédentaire ou l'énergie issue du freinage par récupération recharge le système de stockage d'énergie, augmentant ainsi l'efficacité énergétique. La source d'énergie des trains hybrides bimodes est modifiable de manière dynamique pour permettre un fonctionnement zéro émission (et moins bruyant) dans les gares ou aux endroits les plus appropriés.

Un autre type de locomotive hybride est la locomotive diesel-électrique à caténaires. Son moteur principal est un moteur diesel, mais elle est équipée d'un pantographe qui lui permet de fonctionner en mode électrique avec un système de caténaires.

Les locomotives hybrides bimodes sont déjà en service dans de nombreux cas. L'ALP45-DP de Bombardier/Alstom est exploitée par New Jersey Transit et EXO Montréal. Auparavant, les locomotives circulaient en mode électrique sur l'ensemble de la ligne Deux-Montagnes et le long de la ligne Mascouche entre la Gare Centrale de Montréal et la gare d'Ahuntsic. Mais depuis janvier 2020, avec la récente conversion de la ligne Deux-Montagnes en ligne

³² theicct.org

³³ theicct.org

principale du Réseau Express Métropolitain (REM) et la suppression permanente de la ligne Mascouche jusqu'à la station Ahuntsic, les locomotives roulent exclusivement en mode diesel.

Un autre cas notable est celui du train électrique caténaire-batterie actuellement exploité au Japon, appelé Series EV-E301.³⁴ Ce train de voyageurs circule en mode caténaire entre Utsunomiya et Hoshakuji sur un tronçon de 11,7 km de voies électrifiées, et en mode batterie entre la gare de Hoshakuji et la gare terminale de Karasuyama, sur un tronçon de 22,4 km de voies non électrifiées. Le train est également capable de recharger ses batteries lors de son fonctionnement en mode caténaire.

3.1.4.2 Situation actuelle du marché

Alors que la FLXdrive de Wabtec est actuellement testée avec des locomotives diesel en Amérique du Nord, DB Cargo s'associe à Toshiba pour convertir 300 anciennes locomotives de manœuvre en hybrides diesel-batterie.³⁵

Une option d'hybridation rapide consisterait à ajouter des wagons spécialisés ou wagons-batteries (battery tenders) derrière les locomotives existantes, ce qui permettrait de les échanger rapidement et de les recharger en dehors du train. Cela réduirait considérablement les besoins en carburant et maximiserait le potentiel de freinage par récupération. Ces blocs-batteries sur roues pourraient ensuite être rechargés à des endroits désignés.

3.1.4.3 Impacts sur l'environnement

L'utilisation de technologies de propulsion hybride dans le trafic ferroviaire présente un fort potentiel de réduction des impacts environnementaux du diesel sur les lignes non électrifiées. Les trains hybrides diesels-électriques offrent une meilleure efficacité énergétique, tout en permettant de réduire les besoins en carburant diesel, les émissions de GES et la pollution de l'air. Le projet EcoTrain mené par DB RegioNetz Verkehrs GmbH vise de nouvelles approches pour les véhicules de transport en commun à haut rendement énergétique exploités dans des territoires non électrifiés. Une évaluation de l'impact sur le cycle de vie d'une locomotive hybride (batterie-diesel) réalisée dans le cadre de ce projet a montré une réduction des émissions de $1,04 \times 10^6$ kg éq. CO₂ (15 % de moins) par rapport à un train diesel et une réduction de 16 % de la consommation totale de carburant.³⁶

3.2 DISCUSSION

Étant donné le stade de développement précoce des locomotives électriques à batterie, leur exploitation dans le secteur ferroviaire rencontre encore de nombreuses contraintes. L'impact environnemental associé à la production de batteries aux ions de lithium est une préoccupation majeure. L'exploitation minière du lithium est très peu efficace et nuisible à l'environnement en raison de la contamination des réserves d'eau locales par des produits chimiques nocifs. En outre, les technologies électriques ferroviaires ne peuvent être considérées comme carboneutres que si la production de l'énergie à la source est également carboneutre. De manière générale, il est reconnu que les équipements électriques à batterie sont meilleurs pour l'environnement que ceux alimentés au diesel, malgré l'impact environnemental associé à la fabrication des batteries.

³⁴ [Battery-Electric Cars in Japan: https://www.jreast.co.jp/e/development/tech/pdf_31/tec-31-27-32eng.pdf](https://www.jreast.co.jp/e/development/tech/pdf_31/tec-31-27-32eng.pdf)

³⁵ oliverwyman.com

³⁶ Life Cycle Assessment of a Hybrid Train – Comparison of Different Propulsion Systems: pdf.sciencedirectassets.com

Bien qu'elles n'entrent pas dans le cadre de cette étude, il est bon de mentionner les locomotives à hydrogène, puisque ce rapport traite des modes de propulsion alternative.

Les locomotives alimentées par des piles à hydrogène ont l'avantage de ne produire que de l'eau lors de leur fonctionnement. Toutefois, cette technologie présente ses désavantages. En effet, avec un rendement d'environ 60 %, l'énergie de traction n'est pas aussi efficace que celle générée par la propulsion électrique par batterie. De plus, l'électrolyse qui produit l'hydrogène gazeux servant à alimenter les trains à pile à combustible n'est efficace qu'à environ 80 %, ce qui réduit l'efficacité globale des piles à hydrogène à une valeur proche de 50 %. Par ailleurs, le coût de construction des installations nécessaires à la production d'hydrogène gazeux peut être très élevé.

Dans l'ensemble, malgré leurs inconvénients, les trains alimentés par batterie et par hydrogène sont de meilleures alternatives à la propulsion diesel du point de vue de leur impact environnemental global, et ils sont moins coûteux que les trains électriques à caténaies. Pour le moment, il n'y a pas de technologie de propulsion gagnante : certaines grandes compagnies ferroviaires, telles que le Canadien National et l'Union Pacific, investissent dans les trains électriques à batterie, tandis que d'autres, tels que le Canadien Pacifique et la BNSF, favorisent les trains à hydrogène.

En Amérique du Nord, aucun de ces modes de propulsion alternative n'est encore prêt à supplanter la propulsion diesel. Pour l'instant, les opérateurs ferroviaires devraient éviter de recourir exclusivement à la propulsion par batterie. Par contre, lorsqu'il est utilisé dans le cadre d'une opération hybride, la propulsion électrique à batterie permet d'augmenter de façon significative l'efficacité énergétique et de réduire les émissions de GES.

3.3 MAINTENANCE DU MATÉRIEL ROULANT

Quoique l'expérience du secteur en matière de propulsion par batterie soit encore limitée, l'on s'attend à ce que les coûts d'entretien du train à batterie soient nettement inférieurs à ceux du train diesel-électrique (jusqu'à 75 % de moins). Les éléments essentiels à entretenir dans une locomotive sont les roues, les freins et les moteurs de traction. La durée de vie des batteries est d'environ 10 ans, mais cette valeur dépend des conditions d'exploitation et du nombre de cycles de charge/décharge accumulés au fil du temps.

Les locomotives à batterie disposent aussi d'un système de maintenance des batteries doté de ventilateurs pour les garder à une température optimale de fonctionnement. Ces ventilateurs nécessitent également un entretien régulier.

4. LE CHEMIN DE FER BILLY-DIAMOND

4.1 CARACTÉRISTIQUES GÉNÉRALES

Le tableau suivant présente les caractéristiques générales du chemin de fer Billy-Diamond :

Tableau 4-1 : Caractéristiques du chemin de fer Billy-Diamond

Objet	Caractéristiques	Commentaires
Réseau ferroviaire	Voie de classe 3	Conduite à droite
Écartement	Voie normale	1,435 m (4 pi. 8-1/2 po)
Jours de fonctionnement	340 jours (les trains peuvent rouler de nuit)	
Charge à l'essieu	30,0 tonnes métriques	
Produit net annuel transporté	1,5 million de tonnes (prévues)	
Mode de traction	Diesel-électrique	
Longueur de la voie d'évitement	Distance de dégagement (longueur du train + 10 %)	Dégagement minimum de 200 m

Le tracé du chemin de fer Billy-Diamond s'étend entre Waskaganish situé au PK 236 et Matagami situé au PK 0. Il est illustré par la Figure 4-1 ci-dessous.



Figure 4-1 : Le tracé approximatif du chemin de fer Billy-Diamond

En ce qui concerne le profil vertical, les pentes maximales dans la direction sud (en descendant les PK) sont de 1,50 %, tandis que la pente maximale dans la direction nord est de 1,47 %.

4.2 EXPLOITATION

Comme le chemin de fer sera entretenu et exploité selon les normes de la classe 3, les vitesses maximales d'exploitation suivantes seront applicables sur la ligne, conformément à Transports Canada :

Tableau 4-2 : Limites de vitesse applicables à la classe 3

Type de train	Limite de vitesse
Train de marchandises	40 mi/h / 64 km/h
Train de voyageurs	60 mi/h / 96 km/h

4.2.1 Trains de marchandises

Le trafic de fret sur la ligne devrait être d'environ un train par direction et par jour. Ainsi, le train voyagera un jour vers le sud en direction de Matagami, où il sera chargé/déchargé pendant la nuit. Le lendemain, il remontera vers le nord et passera la nuit à Waskaganish, avant de répéter ce cycle.

Les trains de marchandises serviront divers clients industriels et seront de compositions mixtes. Le Tableau 4-3 présente les types de wagons envisagés pour les opérations de transport de marchandises et leurs spécifications présumées. Une voie d'évitement (site de chargement/déchargement du bois d'œuvre) sera située au PK 60.

Tableau 4-3 : Spécifications des wagons de marchandises

Client/Marchandise	Type de wagon	Charge utile (tonnes)	Poids de la tare (tonnes)	Poids total (tonnes)	Longueur (m)
Critical/Alcam	Wagon-trémie au lithium	79,2	24	103,2	9,2
Nemaska	Wagon plat au lithium	79,3	40,7	120	21,1
Hydro-Québec	Wagon plat de fret	90,1	29,9	120	21,1
S.O.	Wagon plat à bois	82,1	37,9	120	22,4

Le tableau suivant présente la composition des trains prévue au moment de la rédaction de ce rapport :

Tableau 4-4 : Configuration du train de marchandises

Trajet	Configuration du train	Poids total transporté
<ul style="list-style-type: none"> Vers le sud Début PK 236 (Waskaganish) Fin PK 60 (voie d'évitement [bois]) 	<ul style="list-style-type: none"> 38 wagons-trémies au lithium chargés 19 wagons plats au lithium chargés 6 wagons plats vides 	6 381 tonnes
<ul style="list-style-type: none"> Vers le sud Début PK 60 (voie d'évitement) Fin PK 0 (Matagami) 	<ul style="list-style-type: none"> 38 wagons-trémies au lithium chargés 19 wagons plats au lithium chargés 8 wagons plats chargés de bois d'œuvre 6 wagons plats vides 	7 341 tonnes
<ul style="list-style-type: none"> Vers le nord Fin PK 0 (Matagami) Début PK 60 (voie d'évitement) 	<ul style="list-style-type: none"> 38 wagons-trémies au lithium vides 19 wagons plats au lithium vides 8 wagons plats à bois d'œuvre vides 6 wagons plats chargés 	2 709 tonnes
<ul style="list-style-type: none"> Vers le nord Fin PK 60 (voie d'évitement) Début PK 236 (Waskaganish) 	<ul style="list-style-type: none"> 38 wagons-trémies au lithium vides 19 wagons plats au lithium vides 6 wagons plats chargés 	2 405 tonnes

En ce qui concerne la traction des trains diesel qui est actuellement le principal mode de propulsion envisagé, on suppose qu'elle sera assurée par deux locomotives EMD SD70. Cette locomotive mondialement utilisée depuis des décennies constitue le modèle de choix pour l'exploitation des trains de marchandises. De plus, elle est

facilement disponible sur le marché de l'occasion, ce qui permet des économies supplémentaires sur le coût d'investissement du projet. Le Tableau 4-5 présente les spécifications des locomotives EMD SD70.

Tableau 4-5 : Spécifications des locomotives EMD SD70

Objet	Spécification
Modèle	SD70
Poids (tonnes)	194,4
Nombre d'essieux	6
Charge par essieu (tonnes)	32,4
Longueur (m)	22,04
Puissance (HP)	4300
Adhésion maximale (%)	26

4.2.2 Trains de voyageurs

Deux trains de voyageurs par semaine circuleront sur le chemin de fer de la route Billy-Diamond. Le Tableau 4-6 résume le service de trains prévu.

Tableau 4-6 : Service de trains de voyageurs sur le chemin de fer Billy-Diamond

Jour	Lundi	Mardi	Mercredi	Jeudi	Vendredi	Samedi	Dimanche
Trajet	Vers le sud (Waskaganish à Matagami)	Pas de service	Pas de service	Vers le nord (Matagami à Waskaganish)	Vers le sud (Waskaganish à Matagami)	Pas de service	Vers le nord (Matagami à Waskaganish)

Les trains de voyageurs seront composés d'une locomotive, de trois voitures de voyageurs et d'un wagon de groupe électrogène. Une locomotive de fret tirera les voitures de voyageurs pour simplifier la gestion et la maintenance du parc ferroviaire en n'ayant qu'un seul type de locomotive à entretenir. Le wagon-générateur produira l'énergie requise pour les voitures de voyageurs. Les spécifications du matériel roulant sont présentées dans le Tableau 4-7 ci-dessous.

Tableau 4-7 : Spécifications pour la voiture de voyageurs et le groupe électrogène

Objet	Spécifications
Modèle	Voiture voyageurs/groupe électrogène
Poids (tonnes)	56,15
Nombre d'essieux	4
Charge par essieu (tonnes)	14,04
Longueur (m)	20

5. HYPOTHÈSES

Il importe de noter que certaines caractéristiques du projet pourraient changer après l'achèvement du présent rapport. La section suivante présente les hypothèses sur lesquelles se base cette étude.

5.1 DISPONIBILITÉ DE L'ÉQUIPEMENT

Comme l'indique la section 3.1.2, la fourniture de locomotives de fret électriques à caténaires pour le projet La Grande Alliance pose des enjeux majeurs. Plusieurs locomotives électriques à batterie sont en cours de développement et actuellement testées en Amérique du Nord. Bien que la technologie en soit encore à ses débuts, on suppose que d'ici le début de l'exploitation du chemin de fer Billy-Diamond, des locomotives électriques à batterie répondant aux spécifications indiquées dans le Tableau 5-1, voire plus, seront disponibles à l'achat :

Tableau 5-1 : Spécifications des locomotives à batterie pour les besoins de la présente étude

Objet	Spécifications ³⁷		
	FLXdrive de Wabtec ³⁸	Loco à batterie PR type 1	Loco à batterie PR type 2
Modèle	FLXdrive de Wabtec ³⁸	Loco à batterie PR type 1	Loco à batterie PR type 2
Poids (tonnes)	195	195	260
Nombre d'essieux	6 (Co-Co)	6 (Co-Co)	8 (BB-BB)
Charge par essieu (tonnes)	32,5	32,5	32,5
Longueur (m)	23,32	23,3	24
Puissance (HP)	4 291	6 034	8 716
Adhésion maximale utilisée (%)	31	31	31
Capacité de la batterie (MWh)	7,0	8,0	14,5

5.2 BESOINS ÉNERGÉTIQUES

Pour cette étude, les besoins énergétiques ont été calculés grâce au logiciel TPC (Train Performance Calculator) de Railsim développé par SYSTRA. Ce logiciel permet de simuler les performances du train en tenant compte des éléments suivants :

- La géométrie de la voie, y compris l'alignement horizontal et le profil vertical.
- Les limites de vitesse sur la ligne.
- Les informations détaillées du matériel roulant, y compris l'effort de traction de la locomotive, le poids des différents équipements, et autres spécifications.

³⁷ Les spécifications des locomotives à batterie de types 1 et 2 ont été fournies par Progress Rail (PR). Toutefois, ces locomotives sont encore en cours de développement et les spécifications pourraient changer à l'avenir.

³⁸ <https://www.wabteccorp.com/newsroom/press-releases/roy-hill-sets-new-course-with-purchase-of-flxdrive-battery-locomotive>

Le TPC permet de déterminer les besoins de traction des trains et l'énergie consommée (électricité ou carburant diesel). Le Tableau 5-1 ci-dessous donne un exemple de résultats obtenus à l'aide du logiciel Railsim TPC.

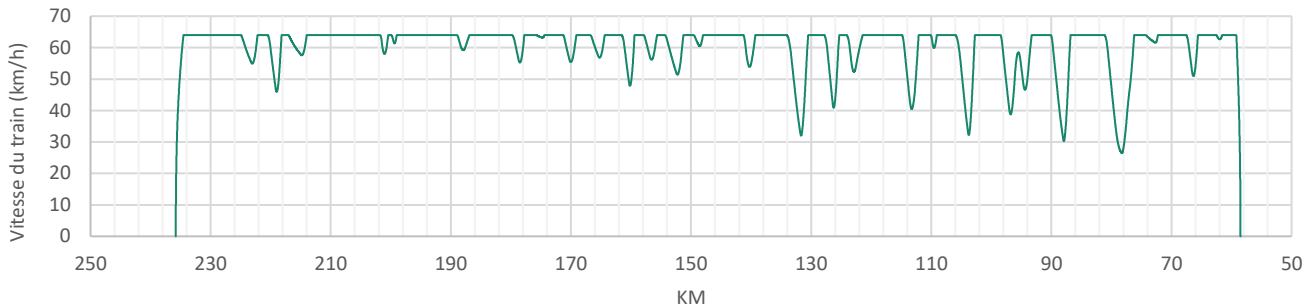


Figure 5-1 : Vitesse du train pour un train de fret tiré par deux locomotives à batterie PR de type 1 roulant vers le sud depuis Waskaganish (PK 236) jusqu'à la voie d'évitement pour le bois d'œuvre (PK 60).

Des simulations ont été effectuées pour chaque scénario étudié afin de calculer l'énergie nécessaire pour chaque trajet. Cette valeur a ensuite été augmentée de 5 % pour tenir compte, d'une part, de la variabilité de la puissance réelle consommée par une locomotive en fonction des conditions spécifiques et de la particularité des opérations d'un jour donné, et d'autre part de l'énergie consommée lors de la circulation des trains dans les gares de triage.

L'énergie totale requise par trajet est indiquée dans le Tableau 5-2. Afin de réduire l'énergie requise pour un trajet donné, les locomotives à batterie pourront capter une partie de l'énergie libérée lors du freinage pour se recharger. On estime que la régénération permettra de réduire les besoins énergétiques d'environ 15 à 18 %. Étant donné que les batteries ne peuvent capter toute l'énergie régénérée (car elle pourrait dépasser leur taux de charge maximal), on a supposé que l'efficacité de la recharge pendant le freinage serait d'environ 60 %.

Tableau 5-2 : Énergie nécessaire à la traction par trajet d'un train tiré par deux locomotives à batterie

Trajet	Loco à batterie PR type 1 (train à 2 locomotives)		Loco à batterie PR type 2 (train à 2 locomotives)	
	Sans régénération d'énergie	Avec régénération d'énergie	Sans régénération d'énergie	Avec régénération d'énergie
Vers le sud (PK 236 – 0)	25,07 MWh	21,42 MWh	26,19 MWh	22,38 MWh
Vers le nord (PK 0 – 236)	13,80 MWh	11,46 MWh	13,68 MWh	11,33 MWh

Les besoins énergétiques des locomotives électriques à caténaires seront essentiellement les mêmes que ceux des locomotives à batterie. Bien que les premières puissent aussi régénérer de l'énergie lors du freinage, le trafic sur la ligne ne sera pas suffisant pour qu'elle soit récupérée. Les locomotives électriques à caténaires n'ont aucun moyen de stocker l'énergie, et pour éviter les pertes il faudrait qu'un autre train soit suffisamment proche pour capter l'énergie transmise en même temps qu'elle est régénérée.

5.3 ENJEUX LIÉS AUX LOCOMOTIVES À BATTERIE

L'utilisation de batteries dans les opérations ferroviaires représente encore un défi à l'heure actuelle en raison des nombreuses limitations propres à la technologie. Le choix d'un mode de propulsion adéquat varie en fonction des conditions d'exploitation spécifiques et doit tenir compte des principaux facteurs suivants :

- La longueur des trajets.
- Le climat local.
- Le tonnage transporté.
- La géométrie et les pentes de la voie.
- La disponibilité d'une infrastructure électrique pour recharger les batteries.
- La flexibilité des opérations pour tenir compte du temps nécessaire à la recharge.

Les enjeux suivants liés à l'usage de locomotives à batterie ont été analysés dans cette étude et devraient être pris en considération lors de la mise en œuvre de ce mode de traction :

- Le climat local du projet La Grande Alliance implique des mois d'hiver rigoureux, au cours desquels les basses températures auront un impact négatif significatif sur la capacité des batteries à fournir l'énergie de traction nécessaire. Bien qu'il soit difficile d'évaluer l'impact exact en se basant sur l'expérience du secteur automobile, on estime que la charge de batterie disponible pour la traction de la locomotive pendant les mois d'hiver sera réduite d'environ 35 %.
- En raison de la grande distance parcourue par les trains entre les terminaux de Matagami et de Waskaganish, il faudra disposer de batteries de stockage auxiliaires pour compléter celles des locomotives et fournir la quantité d'énergie requise pour le voyage.
- Afin de limiter l'usure des batteries et l'impact sur leur capacité disponible, il pourrait s'avérer indispensable de garer les locomotives à l'intérieur des ateliers de maintenance pendant les froides nuits d'hiver. En cas de manque d'espace de stockage de batteries, un système de chauffage supplémentaire sera essentiel pour préserver leur état.
- La charge rapide des batteries doit être limitée au minimum, car elle augmente leur taux d'usure et réduit leur durée de vie. Par ailleurs, elle ne permet de charger les batteries à plus de 95 %.
- Pour limiter l'usure des batteries et garantir leur durée de vie maximale, leur charge ne doit pas tomber en dessous de 20 %. Cela réduit la charge utilisable de la batterie des trains.
- Il est clair à l'heure actuelle que la capacité des batteries diminue avec le temps à cause de l'usure. On estime une perte de charge d'environ 25 % sur une période de 10 ans. Cette perte a été prise en compte dans la présente analyse, afin de garantir que, même avec 75 % de la charge disponible, les trains pourront effectuer leur trajet.
- Le taux de charge des batteries fournies par Progress Rail était de 1,2 MW pour une charge rapide allant jusqu'à 80 %. Compte tenu de l'importante capacité de batterie requise pour les trains, il pourrait s'avérer opportun d'installer plusieurs bornes de charge à chaque terminal pour recharger les locomotives en parallèle afin de réduire le temps total requis.

5.4 ALIMENTATION DU CHEMIN DE FER

Qu'il s'agisse de locomotives électriques à caténaires ou de locomotives à batterie, l'un des enjeux principaux est de fournir toute l'énergie électrique nécessaire pour les opérations ferroviaires. Pour le projet actuel, on a supposé qu'un contrat adéquat serait établi avec Hydro-Québec (HQ) qui possède déjà des infrastructures à proximité du projet La Grande Alliance, comme le montre la Figure 5-2.

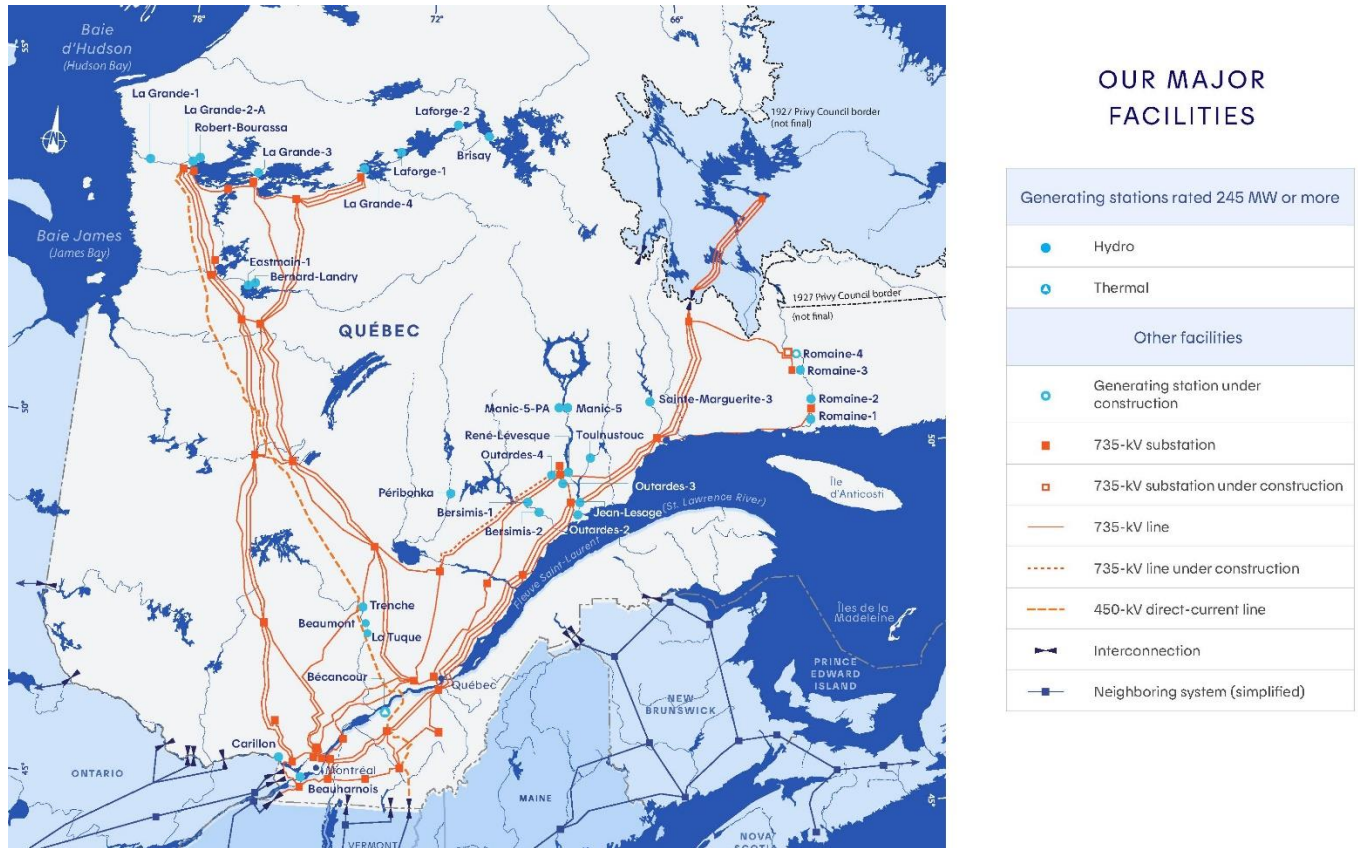


Figure 5-2 : Carte des installations d'Hydro-Québec³⁹

³⁹ Rapport annuel d'Hydro-Québec 2021

6. DESCRIPTION DES SCÉNARIOS

Les scénarios suivants seront analysés dans le présent rapport :

- Option A : électrification complète du chemin de fer avec des locomotives à caténaires
- Option B : trains alimentés par batterie
 - Scénario B1 : Charge des locomotives à Waskaganish et Matagami.
 - Scénario B2 : Charge des locomotives à Waskaganish, Matagami et à une station de ravitaillement à mi-parcours (PK 118).
 - Scénario B3 : Charge des locomotives à Waskaganish et Matagami, et échange des batteries à mi-parcours (PK 118).
 - Scénario B4 : Exploitation d'un train hybride composé de deux locomotives diesel et d'une locomotive à batterie, et recharge de la locomotive à Waskaganish et à Matagami.

6.1 OPTION A : LOCOMOTIVES ÉLECTRIQUES À CATÉNAIRES

L'utilisation de locomotives électriques à caténaires nécessiterait l'électrification complète du chemin de fer, avec la construction de poteaux caténaires le long de la ligne utilisant un système d'alimentation 2 x 25 kV. La Figure 6-1 ci-dessous illustre l'architecture globale du réseau d'électrification depuis le réseau d'Hydro-Québec jusqu'au train.

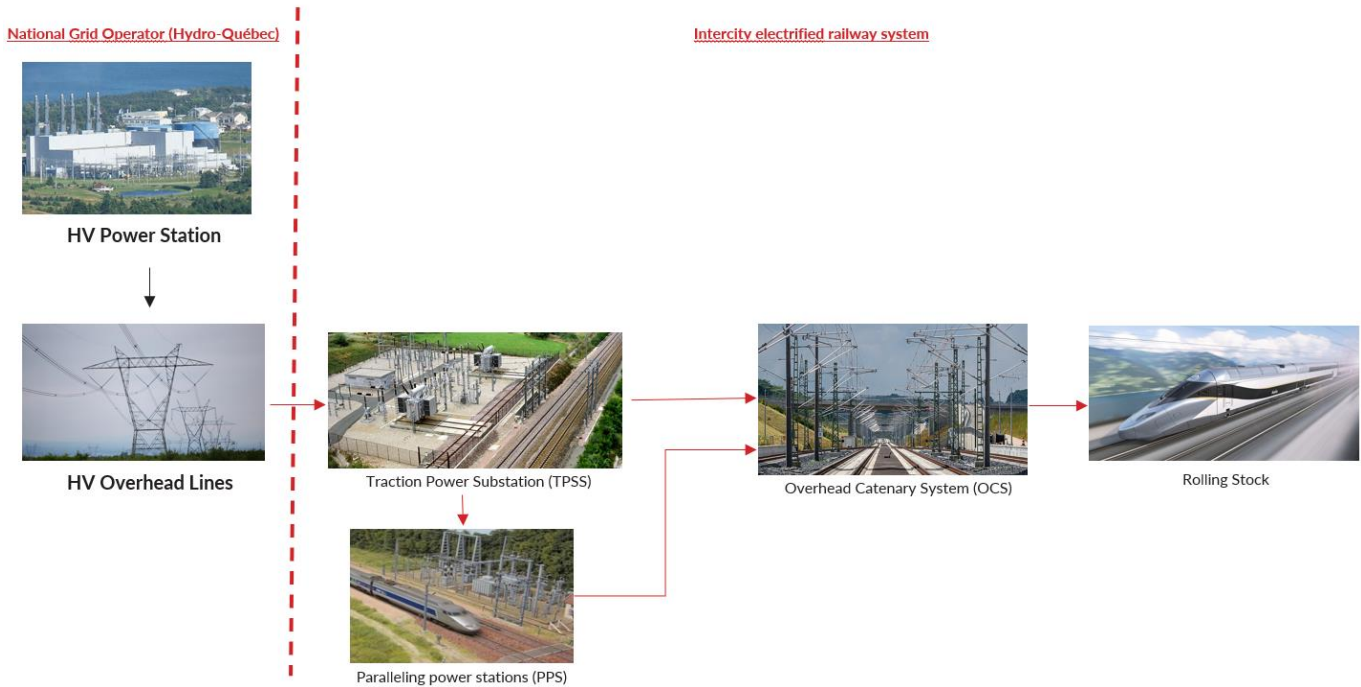


Figure 6-1 : Schéma de l'infrastructure d'électrification requise

La sous-station transforme le courant du réseau à haute tension en 25 kV pour alimenter la caténaire. Un câble d'alimentation supplémentaire, appelé artère (feeder), qui est en phase opposée à la caténaire, est également à un potentiel de 25 kV par rapport au rail. La différence de potentiel entre la caténaire et l'artère est de 50 kV.

L'énergie électrique est ensuite transportée sur une grande distance sous une tension de 50 kV (entre l'artère et la caténaire) pour réduire les pertes, tandis que l'autotransformateur fournit l'énergie au train à 25 kV (entre la caténaire et le rail).

De plus, le courant alimentant le train provient des deux autotransformateurs qui l'entourent (devant et derrière lui), abaissant le courant dans une section de caténaire.

Ce type d'électrification présente de nombreux avantages :

- Il nécessite moins de sous-stations (espacées d'environ 80 km).
- Il élimine la chute de tension.
- Il limite les impacts du CEM et des courants vagabonds.
- Il est capable de répondre à la demande de puissance requise pour les trains à haute fréquence ou les opérations à grande vitesse.
- Il convient généralement aux opérations ferroviaires sur de longues distances.

6.2 OPTION B : LOCOMOTIVES ÉLECTRIQUES À BATTERIE

6.2.1 Scénario B1 : Charge au terminal

Dans ce scénario, deux locomotives électriques à batterie fourniraient la force motrice au train. Un système de batteries supplémentaires d'une capacité suffisante pour assurer le trajet entre les terminaux (~236 km) viendrait compléter les batteries internes des locomotives. Celles-ci se rechargeraient à chaque terminal (Waskaganish et Matagami) durant la nuit et seront prêtes à effectuer un voyage complet le jour suivant.

En raison des longues distances, du tonnage transporté, du temps froid et des pentes de la voie ferrée, ce scénario est exigeant en matière de capacité de batterie pour chaque train.

Le principal avantage de ce scénario est la réduction au minimum des besoins en infrastructures. Toutefois, tant que la fiabilité et les performances des batteries n'auront pas été prouvées dans des conditions d'exploitation hivernales difficiles comme celles qui prévalent actuellement au Québec, ce scénario comporte le risque d'une panne de train qui poserait des problèmes importants dus à l'absence d'infrastructure de recharge le long de la ligne.

6.2.2 Scénario B2 : Recharge à une station située à mi-parcours (PK 118)

Dans ce scénario, le train se rechargerait à chaque terminal (Matagami et Waskaganish), et une station de ravitaillement serait située à mi-parcours du chemin de fer Billy-Diamond, approximativement au PK 118. Ce scénario supprime l'inconvénient du scénario B1 grâce à la recharge à mi-parcours. Il en résulte une réduction d'environ 50 % de la capacité de batterie requise par le train et une diminution significative du risque de panne. Cependant, l'infrastructure de recharge supplémentaire nécessitera des coûts d'investissement additionnels, du personnel d'assistance à la station et augmentera la durée totale du voyage.

Des technologies de recharge ultrarapide (de l'ordre de quelques minutes) se développent actuellement, mais elles impliquent des besoins énergétiques très élevés à la station de ravitaillement. Par ailleurs, la technologie n'est pas encore assez avancée pour atteindre le taux de charge et la capacité des batteries qu'exige l'exploitation ferroviaire. Un représentant de Progress Rail a estimé que, dans l'état actuel des avancées technologiques relatives aux batteries, une locomotive équipée d'une batterie de 8 MWh peut passer rapidement de 20 % à 80 % de charge en 4 heures environ. Par conséquent, le temps nécessaire pour recharger le train à la station devrait être de l'ordre de quelques heures dans le meilleur des cas.

6.2.3 Scénario B3 : Remplacement des batteries à mi-parcours (PK 118)

Ce scénario est similaire à celui de la recharge à mi-parcours, mais au lieu de procéder à une recharge rapide aux arrêts, les batteries épuisées seraient remplacées par des batteries entièrement chargées dans des installations désignées à cet effet. Le processus d'échange serait beaucoup plus rapide que la recharge et ferait donc gagner considérablement de temps par rapport au scénario B2.

Il importe de noter que le remplacement des batteries à bord des locomotives est impossible à l'heure actuelle, car compliqué. En effet, il nécessiterait des ponts roulants et des équipements de manipulation adaptés à la manutention des batteries, ainsi que des mesures de sécurité supplémentaires pour atténuer les risques d'incendie et d'explosion de produits chimiques.

Par contre, l'échange de wagons-batteries déchargés avec des wagons entièrement chargés serait aussi simple que le dételage et l'échange de wagons. Le temps nécessaire à cette opération serait de l'ordre de quelques

minutes. Toutefois, cette option nécessite des voies supplémentaires pour stocker ces wagons-batteries pendant leur recharge et l'achat de wagons additionnels.

6.2.4 Scénario B4 : Approche hybride diesel-batterie

En combinant des locomotives à moteur diesel et des locomotives à batterie, ce scénario permet de réduire le risque lié au stade de développement précoce des locomotives à batterie, tout en offrant la possibilité de tester cette technologie et de bénéficier de la réduction des besoins en carburant diesel et des émissions de GES. Des équipements et des infrastructures supplémentaires pourront être ajoutés au fur et à mesure des progrès technologiques, pour arriver ultimement dans le futur à des opérations carboneutres.

Dans ce scénario, la traction des trains sera assurée par deux locomotives diesel et une locomotive à batterie. Aucun wagon-batterie n'a été envisagé, mais l'ajout de tels wagons permettrait d'améliorer la consommation de carburant et de réduire les émissions de GES.

La locomotive à batterie sera placée entre les deux locomotives diesel, à l'instar de l'approche adoptée par Roy Hill avec la FLXdrive de Wabtec,⁴⁰ et pourra recharger ses batteries lors du freinage. La locomotive à batterie, à elle seule, n'a pas assez d'énergie pour remplacer complètement une locomotive diesel, d'où la nécessité d'avoir deux locomotives diesel.

⁴⁰ <https://www.wabteccorp.com/newsroom/press-releases/roy-hill-sets-new-course-with-purchase-of-flxdrive-battery-locomotive>

7. MODÉLISATION DE L'ÉNERGIE STATIQUE

La modélisation énergétique a été réalisée à l'aide de calculs statiques pour déterminer les besoins en matière de capacité de batterie et l'impact du temps nécessaire pour recharger les locomotives. Ces calculs se sont basés sur les résultats des simulations TPC et les hypothèses décrites dans les sections précédentes.

L'estimation de l'énergie nécessaire à la traction par rapport à la capacité énergétique des batteries constitue l'élément le plus important de cette analyse.

Pour assurer la robustesse des résultats fournis, les calculs d'énergie ont été effectués pour le scénario le plus défavorable qui tient compte d'une capacité de batterie réduite en raison du climat froid et de l'usure de la batterie.

7.1 CAPACITÉ DE LA BATTERIE DISPONIBLE

La première étape de la modélisation de l'énergie statique consiste à calculer la capacité de batterie disponible de chaque locomotive et des wagons-batteries. Le tableau suivant montre la capacité disponible pour chaque type de locomotive et pour les wagons-batteries.

Tableau 7-1 : Capacité de batterie disponible pour les locomotives et les wagons-batteries

Modèle	FLXdrive de Wabtec ⁴¹	Loco à batterie PR type 1	Loco à batterie PR type 2	Wagons-batteries
Capacité totale de la batterie (MWh)	7,0	8,0	17,7	5,0
Capacité de la batterie disponible (MWh)	2,7	3,1	6,9	1,9

Tel que le montre le Tableau 7-1 ci-dessus, la capacité de batterie disponible pour la traction des trains est bien inférieure à la capacité totale des batteries, en raison des pertes causées par le froid et du fait que les batteries ne doivent pas tomber en dessous de 20 % de charge. Par ailleurs, c'est le scénario le plus défavorable qui est envisagé dans lequel les batteries ont perdu 25 % de leur charge à cause de l'usure.

7.2 ANALYSE DES SCÉNARIOS

7.2.1 Scénario B1 : Charge au terminal

Dans ce scénario, la capacité des batteries du train devrait être suffisante pour effectuer un trajet complet en direction sud et un trajet complet en direction nord sur le chemin de fer Billy-Diamond. Les batteries seront rechargées aux terminaux durant la nuit. Le temps de charge disponible aux terminaux est d'environ 12 heures.

D'après les besoins énergétiques indiqués dans le Tableau 5-2, un trajet vers le sud nécessite presque le double d'énergie requise par un trajet vers le nord. Par conséquent, les besoins énergétiques du trajet sud détermineront la configuration du train pour tenir compte de la capacité de batterie nécessaire. Si l'on compare la capacité disponible de deux locomotives à batterie Progress Rail de type 1, soit 6,2 MWh, à l'énergie de traction requise

⁴¹ <https://www.wabteccorp.com/newsroom/press-releases/roy-hill-sets-new-course-with-purchase-of-flxdrive-battery-locomotive>

pour un trajet vers le sud, soit 21,4 MWh (pour les trains de marchandises), il est certain que plusieurs wagons-batteries seront indispensables :

Tableau 7-2 : Calcul des besoins en wagons-batteries pour le scénario B1 (trains de marchandises)

Objet	Composition du train	Loco à batterie PR type 1	Loco à batterie PR type 2
Énergie de traction requise	Vers le sud	21,4 MWh	22,4 MWh
Capacité de batterie disponible (locomotives)	Deux locomotives à batterie	6,2 MWh	11,3 MWh
Capacité de batterie disponible (wagons-batteries)	Loco type 1 : 8 wagons-batteries Loco type 2 : 6 wagons-batteries	15,6 MWh	11,7 MWh
Capacité totale de batterie disponible pour le train	-	21,8 MWh	23,0 MWh

Ainsi, huit wagons-batteries seront nécessaires pour que le train de marchandises (avec deux locomotives à batterie PR de type 1) ait une capacité de batterie disponible suffisante, en plus des 71 wagons de marchandises transportés. L'utilisation de locomotives de type 2 réduirait ce besoin à six wagons-batteries, en raison de leur plus grande capacité. La charge supplémentaire liée au transport des wagons-batteries a également été prise en compte dans les exigences en matière d'énergie de traction, et un procédé itératif a été utilisé pour déterminer la configuration optimale.

Un taux de charge de 1,2 MW a été considéré pour toutes les locomotives et les wagons-batteries. À ce taux de charge, il faudrait :

- 4 heures pour recharger une locomotive à batterie PR de type 1;
- 7,3 heures pour recharger une locomotive à batterie PR de type 2;
- 2,5 heures pour recharger un wagon-batterie de 5 MWh.

Dans ce scénario, compte tenu de l'importante capacité de batterie requise pour un trajet de fret sur le chemin de fer Billy-Diamond, il faudrait 28 heures pour recharger entièrement deux locomotives PR de type 1 et huit wagons-batteries. Comme seulement 12 heures de charge sont disponibles, l'infrastructure de recharge devra permettre de recharger trois véhicules en parallèle, afin de réduire le temps de charge total à environ 10 heures. Le diagramme de la Figure 7-1 décrit le cycle du train pour ce scénario.

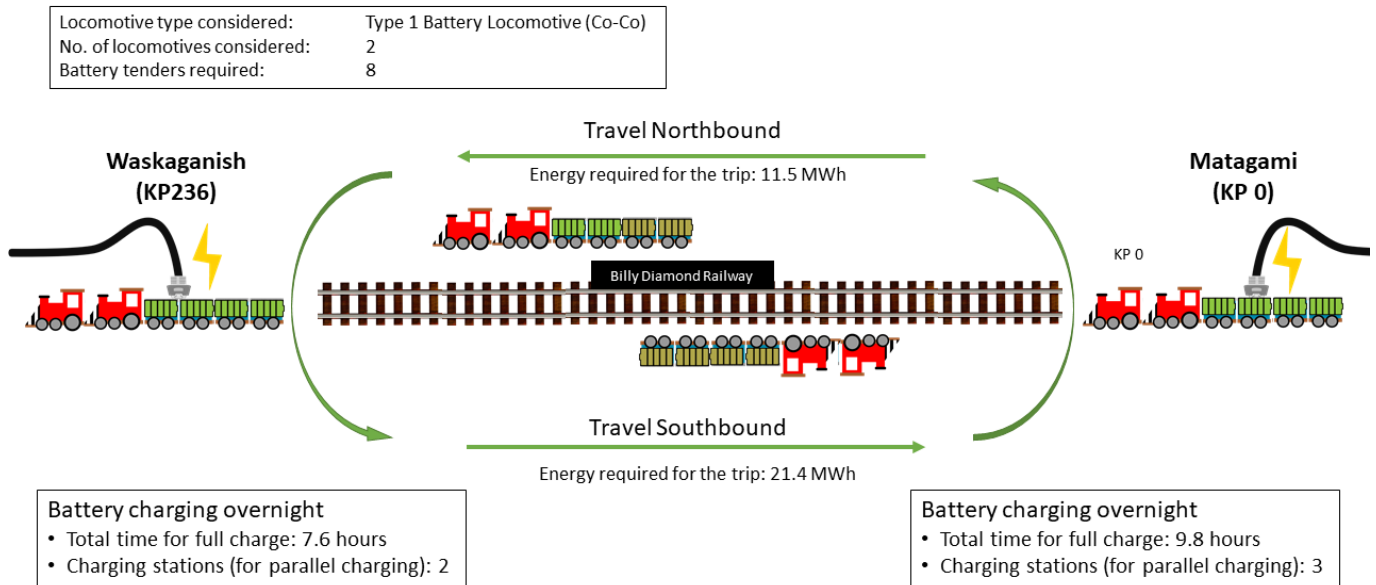


Figure 7-1 : Diagramme du cycle du train (scénario B1)

7.2.2 Scénario B2 : Recharge à une station située à mi-parcours (PK 118)

Le principal avantage de ce scénario est la recharge du train à mi-parcours qui permet de réduire la capacité de batterie requise et le nombre de wagons-batteries nécessaires. La station de ravitaillement a été placée à mi-parcours (PK 118) et les besoins en énergie sont les suivants :

Tableau 7-3 : Besoins en énergie de traction (scénario B2)

Direction	Parcours	Loco à batterie PR type 1	Loco à batterie PR type 2
Vers le sud	PK 236 – 118	9,7 MWh	9,9 MWh
	PK 118 – 0	10,8 MWh	11,4 MWh
Vers le nord	PK 0 – 236	9,5 MWh	9,2 MWh

Comme le montre le Tableau 7-3, le trajet vers le sud est divisé en deux parcours presque égaux dont les besoins en énergie sont très similaires. Par ailleurs, le trajet vers le nord a les mêmes besoins énergétiques que l'un de ces parcours, ce qui permet d'optimiser la configuration du train.

Le tableau 7-4 ci-dessous résume les calculs des besoins pour ce scénario.

Tableau 7-4 : Calcul des besoins en wagons-batteries (scénario B2)

Objet	Composition du train	Loco à batterie PR type 1	Loco à batterie PR type 2
Énergie de traction requise	Vers le sud	10,8 MWh	11,4 MWh
Capacité de batterie disponible (locomotives)	Deux locomotives à batterie	6,2 MWh	11,3 MWh
Capacité de batterie disponible (wagons-batteries)	<ul style="list-style-type: none"> Loco type 1 : 3 wagons-batteries Loco type 2 : 1 wagon-batterie 	5,9 MWh	1,9 MWh
Capacité totale de batterie disponible pour le train	-	12,1 MWh	13,3 MWh

D'après le tableau ci-dessus, Trois wagons-batteries seront nécessaires pour la locomotive PR de type 1, et un seul pour les trains équipés de locomotives de type 2. Il importe de noter ici que les locomotives de type 2 ont une capacité de batterie suffisante pour effectuer le trajet sans wagon-batterie auxiliaire, mais cela se traduirait par un temps de charge beaucoup plus long à la station.

Compte tenu du temps de recharge des locomotives ou des wagons-batteries, il serait impératif de raccourcir au maximum l'arrêt à la station afin de limiter l'impact sur les opérations. Si l'infrastructure permet de recharger trois véhicules en parallèle, le temps de charge nécessaire a été estimé à environ cinq (5) heures. Il doublerait dans le cas de deux véhicules maximum en parallèle.

La Figure 7-2 illustre le cycle du train dans le cas du scénario B2.

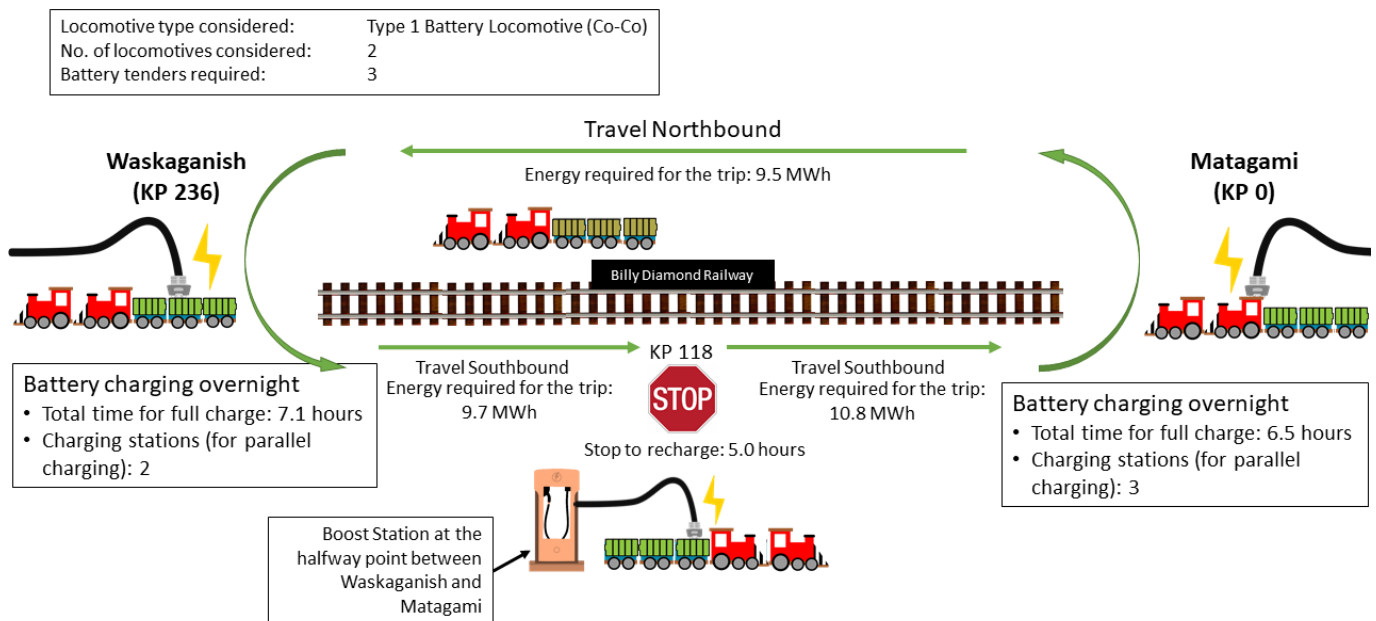


Figure 7-2 : Diagramme du cycle du train (scénario B2)

7.2.3 Scénario B3 : Remplacement des batteries à mi-parcours (PK 118)

Ce scénario considère que des batteries entièrement chargées seront disponibles à la station de ravitaillement du PK 118. Ainsi, le train roulant vers le sud peut faire l'échange de batteries et poursuivre son trajet.

Les trains équipés de locomotives de type 1 nécessiteront quatre wagons-batteries, tandis que ceux équipés de locomotives de type 2 en auront besoin de trois. La Figure 7-3 illustre le cycle du train pour le scénario B3.

Locomotive type considered:	Type 1 Battery Locomotive (Co-Co)
No. of locomotives considered:	2
Battery tenders required:	4

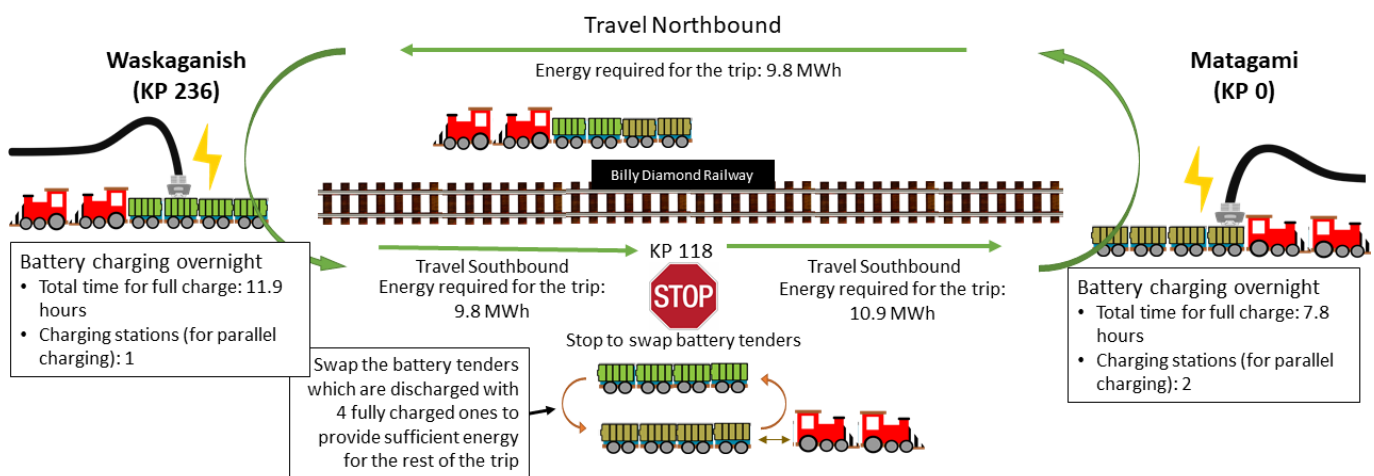


Figure 7-3 : Diagramme du cycle du train (scénario B3)

Ce scénario permet au train de transporter uniquement quatre wagons-batteries et d'éviter de perdre du temps à la station de ravitaillement. Par contre, il implique l'achat de batteries supplémentaires par rapport au scénario B2 et l'installation d'infrastructures de recharge additionnelles par rapport au scénario B1.

7.2.4 Scénario B4 : Approche hybride diesel-batterie

Cette approche combine deux locomotives diesel et une locomotive à batterie. Bien que ce scénario ne soit pas carboneutre, il permet une réduction significative des émissions et de la consommation de carburant, avec un impact minimal sur les opérations et un investissement initial plus faible.

Dans ce scénario, aucun wagon-batterie ne sera tracté par le train. La locomotive à batterie sera rechargée durant la nuit aux terminaux, et le freinage par récupération lui fournira une partie de l'énergie de traction. Par contre, elle pourrait se décharger durant le parcours, et alors les locomotives diesel assureront 100 % de la traction.

Les économies de carburant estimées sont indiquées dans le Tableau 7-5.

Tableau 7-5 : Résumé des économies de carburant pour le scénario B4

Objet	Direction	2 locomotives diesel seulement	2 locos diesel + 1 loco FLXdrive à batterie	2 locos diesel + 1 loco à batterie PR type 1	2 locos diesel + 1 loco à batterie PR type 2
Consommation de carburant diesel (L)	Vers le nord	2 257	1 809	1 625	1 121
	Vers le sud	4 745	4 278	4 126	3 460
	N+S	7 002	6 088	5 751	4 581
Réduction de la consommation de carburant	Vers le nord	-	20 %	28 %	50 %
	Vers le sud	-	10 %	13 %	27 %
	N+S	-	13 %	18 %	34 %

7.2.5 Train de voyageurs

Les trains de voyageurs ont des besoins en énergie de traction bien moindres que les trains de marchandises. Ils se prêtent donc nettement mieux à l'usage de locomotives à batterie. Les calculs montrent qu'ils pourraient effectuer un trajet complet, vers le nord ou vers le sud, sans avoir à recourir aux wagons-batteries, même si le train n'est tracté que par une seule locomotive. Voir l'estimation des besoins énergétiques dans le Tableau 7-6 ci-dessous.

Ainsi, le seul scénario applicable pour un train de voyageurs alimenté par batterie serait le scénario B1, où le train n'est rechargé qu'aux terminaux.

Tableau 7-6 : Besoins en énergie de traction (train de voyageurs)

Objet	Composition du train	Loco à batterie PR type 1	Loco à batterie PR type 2
Énergie de traction requise	Vers le sud	2,5 MWh	2,9 MWh
	Vers le nord	2,4 MWh	2,8 MWh
Capacité de batterie disponible (locomotives)	Une locomotive à batterie	3,1 MWh	6,9 MWh
Capacité totale de la batterie disponible pour le train	-	3,1 MWh	6,9 MWh

En ce qui concerne le scénario hybride, la configuration optimale du train serait composée d'une locomotive diesel et d'une locomotive à batterie. Cette configuration dépendrait toutefois de la possibilité de relier les commandes des deux locomotives de manière à ce que le conducteur puisse contrôler le train à partir de l'une ou l'autre locomotive, quel que soit le mode de traction utilisé (mode batterie ou mode diesel). Dans ce cas-ci, la locomotive à batterie aura toujours une capacité suffisante pour effectuer le trajet complet, et ce scénario hybride permettra de réduire la consommation de carburant de 100 %.

Tableau 7-7 : Consommation de carburant diesel (scénario hybride du train de voyageurs)

Objet	Direction	2 locomotives diesel seulement	1 loco diesel + 1 locomotive ⁴² FLXdrive à batterie	1 loco diesel + 1 loco à batterie PR type 1	1 loco diesel + 1 loco à batterie PR type 2
Consommation de carburant diesel (L)	Vers le nord	463	0	0	0
	Vers le sud	469	0	0	0
	N+S	932	0	0	0
Réduction en consommation de carburant	Vers le nord	-	100 %	100 %	100 %
	Vers le sud	-	100 %	100 %	100 %
	N+S	-	100 %	100 %	100 %

Étant donné que la locomotive à batterie peut prendre en charge, à elle seule, la totalité des besoins de traction du train, la locomotive diesel servira principalement à assurer la relève en cas de panne. Ainsi, pendant l'exploitation normale, la locomotive diesel, étant à l'arrêt, n'engendre ni consommation de carburant ni émission pendant le voyage. Par contre, elle devra être démarrée régulièrement, car l'arrêt du moteur sur de longues périodes détériorerait prématurément son état. Les émissions globales liées à l'exploitation du train de voyageurs ne seraient alors pas tout à fait nulles, mais minimales par rapport à une exploitation purement au diesel.

⁴² On suppose que le FLXdrive peut fonctionner en tandem avec une locomotive diesel en fournissant 100 % de la traction.

7.2.6 Synthèse des résultats de la modélisation énergétique

Le Tableau 7-8 ci-dessous résume les besoins en matériel roulant pour tous les scénarios de batterie.

Tableau 7-8 : Résumé des besoins en matériel roulant pour chaque scénario

Scénario	Type	SD70/loco à passager (locomotive diesel)	Option 1		Option 2		Option 3					
			FLXdrive de Wabtec		Loco à batterie Progress Rail Type 1		Loco à batterie Progress Rail Type 2					
			Locomotives	Wagons-batteries	Locomotives	Wagons-batteries	Locomotives	Wagons-batteries				
B1 (Charge aux terminaux)	En service	0	Non applicable, car la FLXdrive de Wabtec n'a pas été conçue pour fonctionner sans l'assistance de locomotives diesel.		2	8	2	6				
	Recharge	0			1	1	1	1				
	Total	0			3	9	3	7				
B2 (Recharge à la station)	En service	0			Non applicable, car la FLXdrive de Wabtec n'a pas été conçue pour fonctionner sans l'assistance de locomotives diesel.		2	3	2	1		
	Recharge	0					1	1	1	1		
	Total	0					3	4	3	2		
B3 (Échange de batteries)	En service	0					Non applicable, car la FLXdrive de Wabtec n'a pas été conçue pour fonctionner sans l'assistance de locomotives diesel.		2	8	2	6
	Recharge	0							1	1	1	1
	Total	0							3	9	3	7
B4 (Hybride)	En service	2	1	0					1	0	1	0
	Recharge	1	0	0					0	0	0	0
	Total	3	1	0					1	0	1	0
B1 (Passager)	En service	0	Non applicable, car la FLXdrive de Wabtec n'a pas été conçue pour fonctionner sans l'assistance de locomotives diesel.		1	0			1	0		
	Recharge	0			0	0			0	0		
	Total	0			1	0			1	0		
B4 (Passager)	En service	1			1	0	1	0	1	0		
	Recharge	0			0	0	0	0	0	0		
	Total	1			1	0	1	0	1	0		

Le Tableau 7-9 résume l'énergie consommée pour chaque scénario. Durant les mois d'hiver, l'efficacité énergétique a été estimée à 55 %, tandis qu'elle est de 85 % durant les mois d'été. Les batteries nécessitent à peu près la même énergie pour se recharger, mais l'efficacité de la charge diminue en hiver à cause du froid.

Tableau 7-9 : Résumé de la consommation d'énergie pour chaque scénario

Scénario	Configuration de la locomotive	Saison	Énergie consommée pour la charge (MWh)		Carburant consommé (L)	
			Vers le sud	Vers le nord	Vers le sud	Vers le nord
Diesel	2 SD70	Toute saison	0	0	4745	2257
A (Électrique à caténares)	2 locomotives électriques à caténares	Toute saison	25,1	13,8		
B1 (Charge aux terminaux)	2 locos à batterie PR type 1	Hiver	38,8	20,7	Aucun carburant diesel consommé	
		Été	25,2	13,5		
	2 locos à batterie PR type 2	Hiver	40,5	20,5		
		Été	26,3	13,3		
B2 (Recharge à la station)	2 locos à batterie PR type 1	Hiver	37,0	17,2		
		Été	24,1	11,2		
	2 locos à batterie PR type 2	Hiver	38,5	16,7		
		Été	25,0	10,8		
B3 (Échange de batteries)	2 locos à batterie PR type 1	Hiver	37,5	17,8		
		Été	24,3	11,6		
	2 locos à batterie PR type 2	Hiver	39,5	17,9		
		Été	25,6	11,6		
B4 (Hybride)	2 SD70 1 FLXdrive de Wabtec	Hiver	4,9	4,9	4 278	1 809
		Été	3,2	3,2		
	2 SD70 1 loco à batterie PR type 1	Hiver	5,6	5,6	4 126	1 625
		Été	3,7	3,7		
	2 SD70 1 loco à batterie PR type 2	Hiver	10,2	8,6	3 460	1 121
		Été	6,7	5,6		
Diesel (Passager)	1 loco passager (diesel)	Toute saison	0	0	469	463
B1 (Passager)	1 loco à batterie PR type 1	Hiver	4,4	4,4	Aucun carburant diesel consommé	
		Été	2,9	2,9		
	1 loco à batterie PR type 2	Hiver	5,2	5,1		
		Été	3,4	3,3		
B4 (Passager)	1 loco passager (diesel) 1 FLXdrive de Wabtec	Hiver	4,4	4,4		
		Été	2,9	2,9		
	1 loco passager (diesel) 1 loco à batterie PR type 1	Hiver	4,4	4,4		
		Été	2,9	2,9		
	1 loco passager (diesel) 1 loco à batterie PR type 2	Hiver	5,2	5,1		
		Été	3,4	3,3		

7.3 INFRASTRUCTURE ET AUTRES EXIGENCES

Pour les exigences détaillées de l'infrastructure requise par la solution de propulsion A, qui comprend l'utilisation de trains électriques à caténares et l'électrification complète du chemin de fer Billy-Diamond, veuillez vous reporter au rapport de l'étude sur l'électrification complète. (Numéro de référence : LGA-1-BD-T-REL-RT-0001).

Le tableau suivant compare les besoins en infrastructures et autres pour chaque scénario :

Tableau 7-10 : Comparaison des besoins en infrastructures et autres pour chaque scénario, ainsi que de l'impact sur les opérations

	Option A : Électrification complète	Option B1 : Charge aux terminaux	Option B2 : Charge aux terminaux et à mi-parcours	Option B3 : Échange de batteries	Option B4 : Trains hybrides
Infrastructure	Nécessite l'électrification complète du chemin de fer avec une infrastructure caténaire, ainsi que l'équipement électrique (tels que les sous-stations) pour acheminer l'énergie électrique le long de la ligne.	Une station de recharge de batteries à Waskaganish (2 bornes de recharge de 1,2 MW) Une station de recharge à Matagami (3 bornes de recharge de 1,2 MW)	Une station de recharge de batteries à Waskaganish (2 bornes de recharge de 1,2 MW) Une station de recharge à Matagami (3 bornes de recharge de 1,2 MW) Une station de recharge à mi-parcours (PK 118) qui comprend également une voie d'évitement de sorte que la ligne principale reste libre pendant la recharge (3 bornes de recharge de 1,2 MW)	Une station de recharge de batteries à Waskaganish (1 borne de recharge de 1,2 MW) Une station de recharge à Matagami (2 bornes de recharge de 1,2 MW) Une station de recharge à mi-parcours (PK 118) qui comprend également une voie d'évitement de sorte que la ligne principale reste libre pendant la recharge, ainsi qu'une voie de garage pour stocker les wagons-batteries de réserve (1 borne de recharge de 1,2 MW)	Une station de recharge de batteries à Waskaganish (1 borne de recharge de 1,2 MW) Une station de recharge à Matagami (1 borne de recharge de 1,2 MW)
Matériel roulant	4 locomotives électriques à caténaires à la place des locomotives diesel	4 locomotives électriques à batterie à la place des locomotives diesel 9 wagons-batteries de réserve	4 locomotives électriques à batteries à la place des locomotives diesel 4 wagons-batteries de réserve	4 locomotives électriques à batteries à la place des locomotives diesel 9 wagons-batteries de réserve	2 locomotives électriques à batteries en plus de 4 locomotives SD70 (diesel)
Impact sur les opérations	Aucun impact n'est prévu avec les hypothèses actuelles	Aucun impact n'est prévu avec les hypothèses actuelles	Augmentera la durée du trajet vers le sud d'environ 5 heures. Nécessitera une équipe supplémentaire pour le temps additionnel requis par la recharge avant l'arrivée à Matagami.	Aucun impact n'est prévu avec les hypothèses actuelles	Aucun impact n'est prévu avec les hypothèses actuelles

8. COÛT D'INVESTISSEMENT (CAPEX)

Les coûts d'investissement ont été estimés pour chaque scénario à des fins de comparaison. Seuls les coûts directs de construction ont été évalués, les éléments non pertinents pour la comparaison ayant été omis de l'estimation. Le Tableau 8-1 ci-dessous résume les coûts exprimés en dollars américains de 2023.

Tableau 8-1 : Estimation comparative des coûts d'investissement⁴³

Scénario		A	B1	B2	B3	B4	Ref.
	Description	Électrification complète du chemin de fer	Charge aux terminaux	Recharge à la station de ravitaillement	Échange de batteries	Hybride	Coûts de référence (diesel seulement)
CAPEX (M\$)	Total de l'infrastructure	328,3	19,4	34,9	35,1	20,8	-
	Infrastructure d'alimentation électrique	30,6	20,4	30,6	30,6	20,4	-
	Structures caténaïres aériennes	299,7	0,0	0,0	0,0	0,0	-
	Infrastructure de recharge	0,0	0,9	1,5	0,8	0,4	-
	Voie d'évitement supplémentaire (station de recharge)	0,0	0,0	4,8	5,7	0,0	-
	Comparatif de l'atelier de maintenance ⁴⁴	-2,0	-2,0	-2,0	-2,0	0,0	-
	Total du matériel roulant	11,2	59,8	44,8	59,8	22,7	9,4
	Locomotives	11,2	32,8	32,8	32,8	22,7	9,4
	Wagons-batteries	0,0	27,0	12,0	27,0	0,0	0,0
	Total CAPEX	339,5	79,2	79,7	94,9	43,5	9,4
	Augmentation par rapport au scénario de base pour le diesel	330,1	69,7	70,3	85,5	34,1	-

D'après le tableau ci-dessus, le scénario hybride B4 est celui qui nécessite le moins de coûts supplémentaires. Par contre, les scénarios B2 et B3 demandent l'investissement le plus élevé de toutes les options, surtout à cause de la nécessité de construire une station de recharge qui requiert des voies et des infrastructures supplémentaires.

En ce qui concerne l'électrification complète avec caténaïres (scénario A), les coûts d'investissement initiaux sont nettement plus élevés, en raison du coût de construction de l'infrastructure caténaire sur toute la longueur du chemin de fer. Pour les coûts d'investissement (CAPEX) détaillés de chaque scénario, veuillez vous référer à l'annexe 5 A.

⁴³ Une locomotive électrique à caténaïres équivalente à la SD70 a été considérée pour le scénario A. Pour les scénarios B1, B2 et B3, les estimations fournies sont basées sur l'utilisation d'une locomotive à batterie PR de type 1. Pour le scénario B4, on a considéré l'utilisation d'une locomotive Wabtec FLXdrive.

⁴⁴ Il s'agit de la différence de coût de construction des ateliers de maintenance du matériel roulant pour les trains à caténaïres et les trains à batterie. Puisque ces types de locomotives n'ont pas de moteur diesel, certains équipements de l'atelier seront superflus. L'équipement supplémentaire requis à l'atelier de maintenance pour entretenir les locomotives à batterie et les locomotives à caténaïres serait insignifiant.

9. COÛT D'EXPLOITATION (OPEX) ET D'INVESTISSEMENT DE MAINTIEN

Pour chaque scénario, les coûts d'exploitation ont été estimés sur une durée du projet de 50 ans à des fins de comparaison portant sur la consommation d'énergie et l'entretien du matériel roulant et de l'infrastructure. Ces éléments sont responsables de la plus grande différence de coût entre les différents modes de propulsion comparés. L'estimation des coûts d'investissement de maintien relatifs à l'entretien du matériel roulant et des infrastructures a été établie pour cette même période. Un coût moyen annualisé a été calculé pour faciliter la comparaison. Tous les coûts sont exprimés en dollars américains de 2023.

Tableau 9-1 : Coûts d'exploitation et d'investissement de maintien pour tous les scénarios⁴⁵

Scénario		A	B1	B2 ⁴⁶	B3	B4	Réf.
Description		Électrification complète du chemin de fer	Charge aux terminaux	Recharge à la station de ravitaillement	Échange de batteries	Hybride	Coûts de référence (diesel seulement)
OPEX - Annuel (M\$)	Total OPEX	3,894	0,764	0,863	0,882	2,334	2,486
	Énergie	0,263	0,337	0,310	0,315	1,669	1,988
	Maintenance du matériel roulant	0,083	0,128	0,103	0,128	0,374	0,498
	Maintenance de l'infrastructure (électrique/batterie)	3,548	0,299	0,450	0,439	0,291	-
	Augmentation par rapport au scénario de base pour le diesel	1,408	-1,723	-1,624	-1,604	-0,153	-
Coût d'investissement de maintien (matériel roulant) - annualisé (M\$)	Total matériel roulant	0,270	4,781	3,306	4,781	1,431	0,552
	Augmentation par rapport au scénario de base pour le diesel	-0,282	4,229	2,754	4,229	0,879	-

Le scénario de l'électrification totale avec caténaires (A) entraîne une augmentation réelle des coûts d'exploitation annuels par rapport au scénario diesel uniquement. Cela est dû au fait que pour un transport d'environ 1,5 MTPA, le trafic sur la ligne n'est pas suffisant pour que les économies d'énergie électrique compensent les coûts élevés d'entretien de l'infrastructure.

Pour les scénarios de trains à batterie, des économies significatives d'énergie et de coûts d'entretien du matériel roulant sont réalisées par rapport au scénario de référence diesel seulement.

En ce qui concerne le coût d'investissement de maintien, nous constatons que le scénario de l'électrification avec caténaires est financièrement plus avantageux que les autres. Cela s'explique par le fait que les batteries des

⁴⁵ Une locomotive électrique à caténaires équivalente à la SD70 a été considérée pour le scénario A. Pour les scénarios B1, B2 et B3, les estimations fournies sont basées sur l'utilisation d'une locomotive à batterie PR de type 1. Pour le scénario B4, on a supposé l'utilisation d'une locomotive Wabtec FLXdrive.

⁴⁶ Ce scénario peut nécessiter une équipe supplémentaire au triage de Matagami pour assurer le déchargement en raison de l'arrivée retardée du train. L'impact exact sur le personnel et le coût annuel du chemin de fer devront être examinés à des stades ultérieurs.

locomotives et des wagons-batteries doivent être remplacées après une durée de vie d'environ 10 ans. Le coût des batteries de la locomotive PR de type 1 a été estimé à environ 4,7 millions de dollars US, et celui d'un seul wagon-batterie à 2,9 millions de dollars US. Les estimations détaillées des coûts d'exploitation et d'investissement de maintien sont fournies à l'annexe 5 B.

10. COMPARAISON DES INVESTISSEMENTS ET DISCUSSION

En ce qui concerne les coûts d'investissement, le scénario (A) de l'électrification avec caténaires est de loin le moins souhaitable (voir la Figure 10-1 ci-dessous).

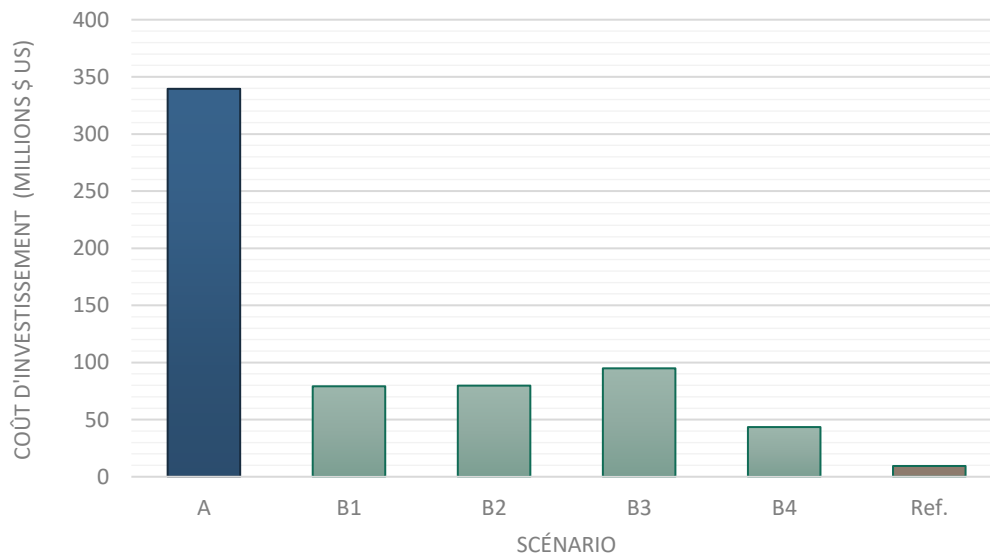


Figure 10-1 : Comparaison des coûts d'investissement de chaque scénario

Si l'on combine le coût d'exploitation et le coût annualisé d'investissement de maintien, le scénario B4 se traduit par le coût annuel combiné le plus faible parmi tous les modes de propulsion évalués.

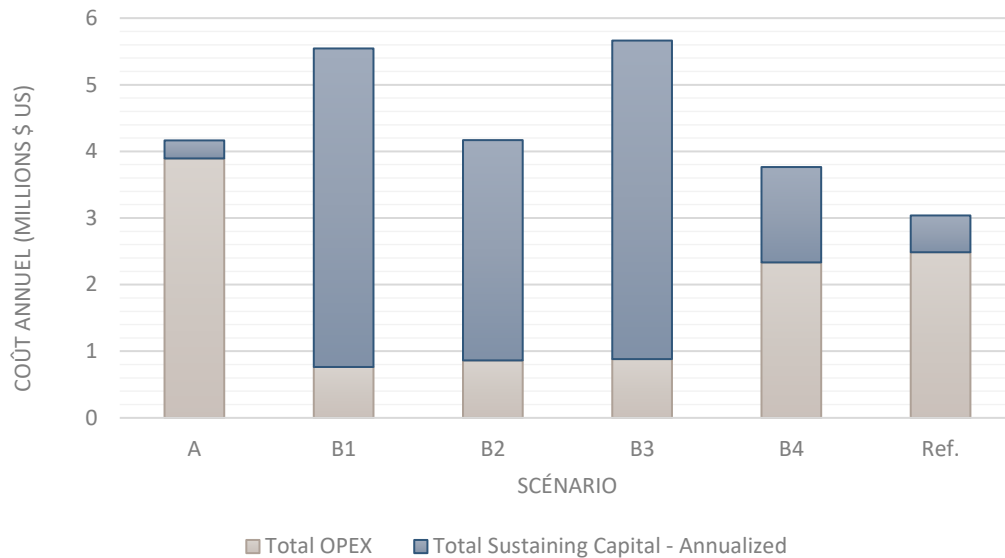


Figure 10-2 : Comparaison des coûts d’exploitation et des coûts annualisés d’investissement de maintien pour les différents scénarios.

Comme le montre la Figure 10-2, tous les scénarios génèrent un coût annuel combiné plus élevé que le scénario de référence avec locomotive diesel. Cela s’explique par le fait que le trafic annuel estimé n’est pas suffisant pour que les économies d’énergie compensent l’augmentation des coûts de maintenance (plus précisément, de maintenance de l’infrastructure d’alimentation électrique et de remplacement des batteries).

Notons qu’au cours des prochaines décennies, le coût des batteries devrait s’améliorer, de même que certaines caractéristiques telles que leur densité énergétique et leur durée de vie. De plus, le coût des combustibles à base de carbone est probablement amené à augmenter. Avec le temps, ces changements pourraient faire pencher la balance en faveur des scénarios de trains alimentés par batterie. La vitesse de tels changements étant difficile à prédire, les considérations de coûts connexes ont été exclues de cette analyse.

Il importe de reconnaître que les émissions de GES et d’autres sous-produits nocifs issus de moteurs à combustion diesel seront réduites de manière significative pour tous les scénarios par rapport au scénario de référence avec diesel seulement. Le tableau ci-dessous résume la réduction annuelle des émissions liées à l’exploitation des trains pour chaque scénario.

Tableau 10-1 : Résumé de la réduction annuelle de la consommation de carburant et des émissions

Scénario	A	B1	B2	B3	B4	Réf. (diesel)
Consommation annuelle de carburant diesel (L)	0	0	0	0	949 653	1 189 240
Consommation annuelle d’électricité (MWh)	6 576	8 418	7 740	7 872	2 030	0
Réduction de la consommation de carburant et des émissions	100 %	100 %	100 %	100 %	20 %	

Il est important de tenir compte du fait que les locomotives à batterie en sont encore à un stade de développement précoce et que les essais n’ont pas été réalisés sur une période suffisamment longue, et à des températures extrêmement basses, pour que l’on puisse tirer des conclusions sur la fiabilité de cette technologie

et son adéquation pour les opérations ferroviaires. Le froid extrême aura probablement des impacts sur la durée de vie des batteries, leur puissance de sortie, l'efficacité de leur charge et d'autres caractéristiques qui diffèrent de celles considérées dans cette étude. Ces risques ne peuvent être ignorés, par conséquent on ne peut recommander à l'heure actuelle de dépendre exclusivement des locomotives à batterie pour les opérations ferroviaires. Ceci inclut les scénarios B1, B2 et B3.

En ce qui concerne le scénario de l'électrification par caténaires, les risques d'approvisionnement sont à prévoir, étant donné qu'aucune locomotive de fret de ce type n'est actuellement fabriquée ou utilisée en Amérique du Nord. Ces risques peuvent se traduire par des coûts d'approvisionnement plus élevés que prévu, ainsi que par des retards de livraison des locomotives. Il se pourrait aussi que leur fiabilité soit inférieure aux prévisions.

Compte tenu de tous les enjeux et risques mentionnés ci-dessus, on recommande une approche par étapes, où seul le scénario hybride à batterie B4 est mis en œuvre dans un premier temps. Cela permettra de tester la technologie des batteries sans s'y fier totalement. Les risques seront fortement atténués grâce à l'assistance des locomotives diesel. En outre, les locomotives alimentées par batterie permettront toujours de réduire considérablement les émissions de GES. Ce scénario présente également l'avantage d'avoir le coût d'investissement le plus faible et les coûts annuels combinés d'exploitation et d'investissement de maintien les plus bas de tous les scénarios de modes de propulsion évalués.

L'approche suivante pourrait être envisagée :

- **Étape 1** : mise en œuvre d'opérations hybrides avec batteries pour les trains de voyageurs uniquement (B4 voyageurs + fret diesel)
- **Étape 2** : opérations hybrides pour les trains de fret et de voyageurs (B4 voyageurs et fret)
- **Étape 3** : remplacement progressif des locomotives diesel par des locomotives à batterie au fil du temps
- **Étape 4** : transition complète vers des trains à batterie

Le potentiel de réduction des émissions liées aux opérations ferroviaires augmente à chaque étape, et les coûts d'investissement peuvent être répartis sur une plus longue période. Cette approche permettrait de réduire les risques liés aux trains à batterie et les coûts d'investissement au début du projet, tout en exploitant les avantages environnementaux de la technologie. Aussi, il est probable que des avancées technologiques importantes voient le jour en temps voulu et qu'on puisse en tirer parti.

11. CONCLUSION

Cette étude vise à analyser et valider la faisabilité de l'utilisation de modes de propulsion alternative ferroviaires pour la phase 1 du chemin de fer Billy-Diamond dans le but de réduire les émissions de GES sur la durée du projet. Trois modes de propulsion sont évalués :

- trains alimentés par batterie;
- trains entièrement électriques alimentés par caténares;
- trains hybrides combinant batterie et diesel.

L'électrification par caténares des chemins de fer n'est pas une technologie nouvelle. Elle est largement utilisée en Europe et sur d'autres continents pour le transport de marchandises et de voyageurs depuis des décennies. Par contre, en Amérique du Nord à l'heure actuelle, les opérations de fret n'utilisent pas de locomotive électrique. D'ailleurs, aucune locomotive électrique de fret n'est fabriquée ni vendue en Amérique du Nord, et leur importation s'avère compliquée en raison de la disparité des normes applicables aux locomotives. De plus, cette approche nécessiterait d'importants coûts d'investissement pour l'infrastructure caténaire.

En ce qui concerne les trains à batterie, la technologie est encore en cours de développement et il manque d'essais approfondis en conditions réelles dans le cadre des opérations de fret. Toutefois, les progrès réalisés dans le secteur automobile devraient apporter des améliorations continues sur des aspects tels que la capacité, la durée de vie et le coût des batteries. Ces avantages devraient également se répercuter sur le secteur ferroviaire et rendre la technologie plus viable au fil du temps.

Enfin, compte tenu des enjeux et des coûts importants liés à l'électrification complète par caténares et de l'état actuel des technologies de propulsion des trains par batterie, l'approche recommandée serait de mettre en œuvre, dans un premier temps, un scénario hybride, dans lequel des locomotives à batterie seraient combinées à des locomotives diesel. Cela permettrait de réduire considérablement les émissions de GES dans le cadre de ce projet, tout en permettant aux opérateurs d'acquérir de l'expérience et de tester la robustesse et la viabilité des locomotives alimentées par batterie. Au fur et à mesure des avancées technologiques, il sera possible d'augmenter progressivement le nombre de locomotives à batterie dans le parc en adoptant une approche par étapes, jusqu'à arriver avec le temps à une transition complète vers ce mode de propulsion.



CREE
DEVELOPMENT
CORPORATION

Respect · Collaboration · Strength